

УДК 621.313.8

СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ С СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЕМ

Т.В.Виштак, А.Н.Карлов, И.П.Кондратенко, докт.техн.наук, А.П.Ращепкин, докт.техн.наук
 Институт электродинамики НАН Украины,
 пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина, e-mail: dep7ied@ukr.net

Разработан итерационный численно-аналитический метод для расчета распределения скорости вращения жидкого металла в кристаллизаторе с синхронным электромагнитным перемешивателем. Приведены для принятого конструктивного исполнения кристаллизатора результаты иллюстративных расчетов распределения скорости вращения жидкого металла и установлены функциональные зависимости максимальной скорости металла у фронта кристаллизации на выходе из перемешивателя и его мощности от частоты тока питания. Библ. 4, рис. 5.

Ключевые слова: синхронный электромагнитный перемешиватель, непрерывное литье, кристаллизатор, скорость вращения, жидкий металл.

Применение электромагнитного перемешивания металла в кристаллизаторах машин непрерывного литья заготовок приводит к интенсификации процессов теплопереноса, способствует выравниванию температуры слитка, повышению производительности установки и улучшению качества металла за счет измельчения зерна, которое достигается, как отмечалось в [2], при скорости движения у фронта кристаллизации на уровне 0,23–1 м/с в зависимости от сорта стали.

Цель работы. Разработать метод расчета распределения скорости вращения жидкого металла в цилиндрическом кристаллизаторе сортовых машин непрерывного литья заготовок с синхронным электромагнитным перемешивателем.

Кристаллизатор совместно с синхронным электромагнитным перемешивателем внешнего размещения содержит медную гильзу с внутренним и внешним радиусами r и r_1 , внутри которой движется кристаллизующийся металл, немагнитный металлический корпус кристаллизатора с внутренним и наружным радиусами r_2 и r_3 , постоянные магниты системы возбуждения синхронного перемешивателя с внутренним радиусом r_4 , немагнитное ярмо магнитной системы с внутренним и наружным радиусами r_5 и r_6 , статор с радиусом расточки r_7 . Между гильзой и корпусом кристаллизатора находится неэлектропроводная обечайка, выполненная из стеклопластика (рис. 1). Магнитное поле в жидком металле для синхронного электромагнитного перемешивателя определяется результирующим магнитным полем системы возбуждения и полем токов обмотки статора.

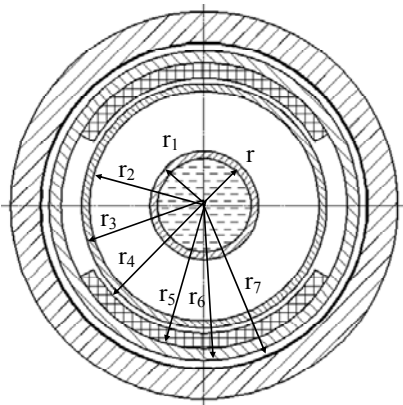


Рис. 1

Распределение преобразованной по Фурье [3] с параметром n z -составляющей векторного магнитного потенциала A_n в жидком металле цилиндрического кристаллизатора, создаваемого системой возбуждения синхронного двигателя с постоянными магнитами, описывается уравнением

$$\frac{\partial^2 A_n}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_n}{\partial \rho} - \left(\frac{n^2}{\rho^2} + im\mu\sigma(\omega - \frac{v_\phi}{\rho}) \right) A_n = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями при $\rho = 0$ согласно [4]

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} \rho \frac{\partial A_n}{\partial \rho} = 0, \quad (2)$$

а при $\rho = r$ в соответствии с выведенной в [3] зависимостью (25)

$$\frac{dA_n}{d\rho} (m_1 K_n(a_2 \rho) - n_1 I_n(a_2 \rho)) - A_n (m_1 \frac{dK_n(a_2 \rho)}{d\rho} - n_1 \frac{dI_n(a_2 \rho)}{d\rho}) = \frac{2C_1 n}{rr_1 r_2}, \quad (3)$$

где m_1 , n_1 , a_2 и $C1_n$ – алгебраические выражения, зависящие от электрофизических параметров и конструктивных размеров элементов перемешивателя и магнитной системы, значения которых приведены в [3]. $I_n(a_2\rho)$ и $K_n(a_2\rho)$ – модифицированные функции Бесселя n -го порядка.

Z-составляющая векторного магнитного потенциала в жидком металле определяется обратным преобразованием дискретного преобразования Фурье в виде ряда, который в неподвижной цилиндрической системе координат (ρ, j, z) принимает вид

$$A_z = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{in(\omega t - \varphi)}. \quad (4)$$

Для определения n -го члена ряда (4) необходимо решить краевую задачу (1)–(3) при соответствующем заданном значении n , причем, вследствие произвольной зависимости v_φ от радиуса, решение ее необходимо выполнять численными методами.

Распределение возбуждаемой токами обмотки статора преобразованной по Фурье [1] z-компоненты векторного магнитного потенциала в жидком металле $A1_n$ описывается уравнением

$$\frac{\partial^2 A1_n}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial A1_n}{\partial \rho} - \left(\frac{n^2}{\rho^2} + i\mu\sigma(\omega - \frac{nv_\varphi}{\rho}) \right) A1_n = 0, \quad (5)$$

удовлетворяющим граничному условию при $\rho = 0$ [4]

$$\lim_{\rho \rightarrow 0} \rho \frac{\partial A_n}{\partial \rho} = 0, \quad (6)$$

а при $\rho = r$, в соответствии с выведенной в [1] зависимостью (28), условию

$$\frac{\partial A1_n(\rho)}{\partial \rho} (u_n K_n(a_2 r) - y_n I_n(a_2 r)) - A1_n(\rho) (u_n \frac{\partial K_n(a_2 r)}{\partial r} - y_n \frac{\partial I_n(a_2 r)}{\partial r}) = \frac{4n^2 C_{11}}{rr_1 r_2 r_3 r_5}, \quad (7)$$

где u_n , y_n , a_2 и $C11$ – алгебраические выражения, зависящие от электрофизических параметров и конструктивных размеров элементов перемешивателя, значения которых приведены в [1].

Z-компонента векторного магнитного потенциала в жидком металле, возбуждаемого токами статорной обмотки, определяется обратным преобразованием дискретного преобразования Фурье в виде ряда, который в неподвижной цилиндрической системе координат (ρ, j, z) в отличие от (4) принимает вид

$$A_z(\rho, \varphi, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A1_n(\rho) e^{i(\omega t - n\varphi)}. \quad (8)$$

Как и при определении n -го члена ряда (4), для определения n -го члена ряда (8) необходимо численными методами решить краевую задачу (5)–(7) для каждого наперед заданного значения n .

Предположим, что в результате численного решения задач (1)–(3) и (5)–(7) найдено n членов рядов (4) и (8), например, $n = (-7, 7)$. Причем, члены рядов равны нулю при четных n , а если коэффициент перекрытия полюсного деления постоянными магнитами равен $2/3$, то и в ряде (4) отсутствуют члены с n , кратными 3. Таким образом, будем полагать приближенно определенными z-составляющие векторного магнитного потенциала, возбуждаемого постоянными магнитами системы возбуждения по (4) и токами статорной обмотки по (8). Тогда из уравнения $rotA = B$ результирующая радиальная составляющая магнитной индукции в жидком металле равна

$$B_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} = -\frac{i}{\rho} \sum_{n=-\infty}^{\infty} n (A_n e^{in(\omega t - \varphi)} + A1_n e^{i(\omega t - n\varphi)}). \quad (9)$$

По закону Ома $j = \sigma(E + v \times B)$, учитывая, что скорость имеет только φ -составляющую, и согласно принятым допущениям $E = -\partial A / \partial t$, найдем z-составляющую плотности тока в жидком металле

$$j_z = -\frac{i\sigma}{\mu} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (n(\omega\rho - v_\varphi) A_n e^{in(\omega t - \varphi)} + (\omega\rho - nv_\varphi) A1_n e^{i(\omega t - n\varphi)}). \quad (10)$$

С использованием (9) и (10) определим среднюю во времени и по окружности радиуса ρ азимутальную составляющую объемной электродинамической силы в жидком металле, вызывающей его азимутальное вращение, (* обозначена комплексно сопряженная величина магнитной индукции)

$$F_\varphi = \frac{f}{2\pi} \int_0^{1/f} \int_0^{2\pi} \text{Re}(j_z) \text{Re}(B_\rho) dt d\varphi = \frac{f}{4\pi} \text{Re} \int_0^{1/f} \int_0^{2\pi} j_z (B_\rho + B_\rho^*) dt d\varphi. \quad (11)$$

Азимутальное движение жидкого металла как вязкой несжимаемой жидкости под действием электродинамической силы F_φ (11) согласно уравнениям Навье–Стокса в цилиндрической системе координат описывается нестационарным дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial v_\varphi}{\partial t} = \frac{F_\varphi}{\gamma} + \zeta \left(\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \rho} - \frac{v_\varphi}{\rho^2} \right), \quad (12)$$

где γ и ζ – плотность и эффективное значение кинематической вязкости жидкого металла.

Поскольку F_φ в процессе разгона жидкого металла зависит от скорости v_φ , определение временной зависимости скорости вращения металла в гильзе кристаллизатора выполняется методом итераций. Представляя производную по времени ее конечно-разностным аналогом, приведем уравнение (12) к одномерному неоднородному уравнению ($v_{\varphi n}$ – начальная скорость расплава на промежутке времени Δt)

$$\frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \rho} - \left(\frac{1}{\rho^2} + \frac{1}{\zeta \Delta t} \right) v_\varphi = - \frac{F_\varphi}{\gamma \zeta} - \frac{v_{\varphi n}}{\zeta \Delta t}. \quad (13)$$

Предположим, что электродинамическая сила (11), найденная в результате решения краевых задач (1)–(3) и (5)–(7) при скорости $v_\varphi = v_{\varphi n}$, действует только в пределах высоты сердечника L перемешивателя и равна нулю за его пределами, а скорость вытяжки заготовки равна v_z . Тогда время воздействия электродинамической силы на жидкий металл равно $T = L / v_z$ и, следовательно, например, при 10 итерациях $\Delta t = T / 10$.

Удовлетворяющее для вязкой жидкости граничным условиям $v_\varphi(0) = v_\varphi(r) = 0$ решение уравнения (13) для k -й итерации представляется зависимостью

$$v_{\varphi k} = \frac{1}{\zeta} \left(I_1(cr) \left(\int_0^r D(\rho) K_1(c\rho) d\rho - \frac{K_1(cr)}{I_1(cr)} \int_0^r D(\rho) I_1(c\rho) d\rho \right) + K_1(cr) \int_0^r D(\rho) I_1(c\rho) d\rho \right), \quad (14)$$

где $D(\rho) = \rho(F_{\varphi k-1} / \gamma + v_{\varphi k-1} / \Delta t)$, $c = \sqrt{1 / \zeta \Delta t}$; $v_{\varphi k-1}$ и $F_{\varphi k-1}$ – азимутальная скорость расплава, найденная на предыдущей итерации, и объемная электродинамическая сила, определенная при скорости вращения жидкого металла на предыдущей итерации.

Полагая в качестве начального условия $v_\varphi = 0$, определяется распределение в зависимости от радиуса результирующего магнитного поля и средней объемной электродинамической силы в жидком металле. Эта сила принимается неизменной на заданном промежутке времени Δt . Решение уравнения (13) с использованием численных методов либо итерационной формулы (14) дает новое значение скорости вращения жидкого металла в зависимости от радиуса по истечении времени Δt . Принимая полученное на предыдущей итерации значение скорости в качестве начального $v_{\varphi n} = v_{\varphi k-1}$, вновь определяется распределение результирующего магнитного поля и средней объемной электродинамической силы в жидком металле $F_{\varphi k-1}$. Далее на основе численного решения уравнения (13) либо формулы (14) определяется k -я итерация скорости. Итерационный процесс выполняется до тех пор, пока не будет исчерпан промежуток времени T , равный времени воздействия на жидкий металл электродинамической силы, либо при необходимости – до достижения установившегося движения расплава. Пусть высота перемешивателя $L = 0,4$ м, а скорость литья заготовки $v_z = 0,1$ м/с, тогда время воздействия магнитного поля на жидкий металл составляет $T = L / v_z = 4$ с. Шаг итерации по времени примем равным $\Delta t = 1$ с, т.е. ограничимся четырьмя итерациями.

Предположим, что питание обмотки статора с числом витков в фазе $w = 150$ и сечением провода равным 20 мм^2 осуществляется от трехфазной сети стабилизированного тока с амплитудой

$$I_A = 90 \text{ А}, \quad I_B = I_A e^{-i2\pi/3}, \quad I_C = I_A e^{i2\pi/3}. \quad (15)$$

При этих условиях возможны два режима работы перемешивателя: с перевозбуждением $x_\varphi = 0,403$ [1] и генерацией реактивной мощности или недо возбуждением $x_\varphi = 0,143$ и потреблением реактивной мощности из сети.

В иллюстрационных расчетах для двухполюсного исполнения синхронного перемешивателя, соответствующего размерам промышленного кристаллизатора для литья цилиндрических заготовок,

принимается, что частота вращения магнитной системы и, следовательно, частота токов обмотки статора равна $f = 5$ Гц, величина коэрцитивной силы постоянных магнитов $I_0 = 9 \cdot 10^5$ А/м, число пар полюсов перемешивателя $p = 1$ и коэффициент перекрытия полюсного деления постоянным магнитом равен $2/3$. Принимается, что электропроводность жидкого металла $\sigma = 7 \cdot 10^5$ С/м, медной гильзы – $\sigma_m = 5 \cdot 10^7$ С/м, металлического корпуса кристаллизатора – $\sigma_k = 1 \cdot 10^6$ С/м, ярма магнитной системы – $\sigma_e = 1 \cdot 10^6$ С/м. Кроме того принимается, что удельная плотность стального расплава $\gamma = 6 \cdot 10^3$ кг/м³ и его кинематическая вязкость $\zeta = 10^{-6}$ м²/с. Для литья круглых стальных заготовок диаметром 0,15 м учтено, что $r = 0,075$ м, $r_1 = 0,088$ м, $r_2 = 0,21$ м, $r_3 = 0,225$ м, $r_4 = 0,23$ м, $r_5 = 0,255$ м, $r_6 = 0,265$ м, $r_7 = 0,27$ м.

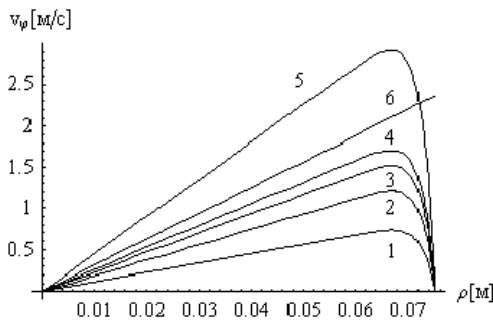


Рис. 2

На рис. 2 показано изменение вдоль радиуса азимутальной скорости движения жидкого металла в гильзе кристаллизатора для ряда временных значений при работе синхронного перемешивателя в режиме перевозбуждения $x_\varphi = 0,403$.

Кривые 1, 2, 3, 4 описывают распределение скорости жидкого металла на 1^й, 2^й, 3^й и 4^й итерациях или, что то же, при $\Delta t = 1$ с через 1, 2, 3 и 4 с после начала воздействия электромагнитного поля на жидкий металл на входе в перемешиватель.

Если предположить, что азимутальная скорость на входе в перемешиватель высотой 0,4 м равна нулю, то при вытяжке заготовки со скоростью 0,1 м/с на выходе перемешивателя через 4 секунды распределение скорости будет описываться кривой 4. Если же электродинамические силы в жидком металле определять при $v=0$, т.е. как в твердом неподвижном металле, то скорость движения расплава по истечении 4 секунд будет описываться кривой 5. Прямой 6 представляется азимутальная скорость вращения магнитного поля. Из сопоставления зависимостей 5 и 6 видно, что вычисленная таким образом азимутальная скорость движения металла превышает скорость вращения магнитного поля, что невозможно. Поэтому в расчетах скорости вращения расплава необходимо электродинамические силы определять с учетом изменения скорости вращения жидкого металла.

В установившемся режиме литья заготовки азимутальная скорость вращения жидкого металла по высоте перемешивателя непрерывно изменяется. Если на входе в перемешиватель скорость $v_{\varphi 0} = 0$, то через 1 секунду на глубине $v_z \Delta t = 0,1$ м азимутальная скорость вращения металла описывается кривой 1 (рис. 2.) Через 2 секунды, т.е. на глубине 0,2 м, распределение скорости металла соответствует кривой 2, на глубине 0,3 м – кривой 3 и, наконец, на выходе перемешивателя на глубине 0,4 м описывается кривой 4. Функциональное от радиуса представление кривых скоростей вращения 1, 2, 3, 4, 5, 6 дается зависимостями

$$\begin{aligned} v_{\varphi 1} &= 11,36\rho - 0,64 \cdot 10^{35} \rho^{31}, & v_{\varphi 2} &= 18,7\rho - 1,042 \cdot 10^{35} \rho^{31}, & v_{\varphi 3} &= 23,4\rho - 1,3 \cdot 10^{35} \rho^{31}, \\ v_{\varphi 4} &= 26,45\rho - 1,47 \cdot 10^{35} \rho^{31}, & v_{\varphi 5} &= 45,16\rho - 2,5 \cdot 10^{35} \rho^{31}, & v_{\varphi 6} &= 2\pi f \rho. \end{aligned} \quad (16)$$

Поэтому в процессе решения в уравнении гидродинамики (12) следовало бы использовать усредненную по высоте перемешивателя электродинамическую силу F_φ (11) или ввести некоторую среднюю скорость по высоте перемешивателя, но ее распределение заранее неизвестно и, следовательно, подобную операцию выполнить не представляется возможным. Между тем, полагая на входе в перемешиватель скорость вращения жидкого металла равной $v_{\varphi 0} = 0$, а на выходе – $v_{\varphi 4}$, определим среднюю скорость вращения жидкого металла в перемешивателе

$$v_{\varphi s} = (v_{\varphi 0} + v_{\varphi 1} + v_{\varphi 2} + v_{\varphi 3} + v_{\varphi 4})/5 = 16\rho - 0,9 \cdot 10^{35} \rho^{31}. \quad (17)$$

Определим при этой скорости путем численного решения краевых задач (1–3) и (5–7) распределение магнитных потенциалов A_n и A_{1n} , а по (11) – электродинамическую силу в жидком металле F_φ , которую будем полагать теперь постоянной по всей высоте перемешивателя. В результате решения уравнения (12) либо (13) с начальной скоростью $v_{\varphi 0} = 0$ под воздействием полученной электродинамической силы по истечении 4 секунд найдем, что на выходе перемешивателя скорость вращения металла равна

$$v_\varphi = 23\rho - 1,3 \cdot 10^{35} \rho^{31}. \quad (18)$$

Какое из этих значений $v_{\phi 4}$ или v_{ϕ} по (18) дает более точное описание распределения скорости металла в кристаллизаторе на основе численных расчетов, определить трудно. Однако, учитывая, что оба не превышают скорость вращения магнитного поля, представляется приемлемым для описания пространственно-временного распределения скорости в пределах перемешивателя воспользоваться любым из них.

Аналогичное по характеру распределение скорости наблюдается и при недовозбужденном синхронном перемешивателе ($x_{\phi} = 0,143$). Здесь лишь вследствие возрастания в расплаве суммарного магнитного поля постоянных магнитов и токовой нагрузки статора существенно увеличивается силовое воздействие на жидкий металл, и при прочих равных условиях возрастает скорость вращения металла.

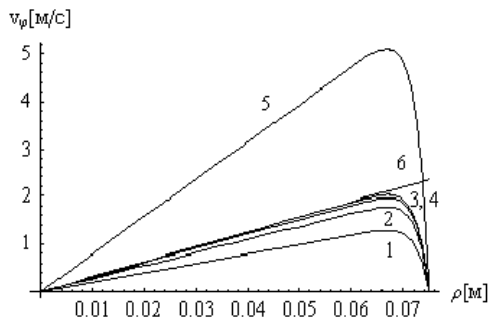


Рис. 3

На рис.3 показано распределение скорости вращения жидкого металла в гильзе кристаллизатора в зависимости от радиуса на 1^й, 2^й, 3^й и 4^й секундах воздействия магнитного поля перемешивателя. Здесь скорости описываются зависимостями $v_{\phi 1} = 19,8\rho - 1,1 \cdot 10^{35} \rho^{31}$, $v_{\phi 2} = 27,4\rho - 1,52 \cdot 10^{35} \rho^{31}$, $v_{\phi 3} = 30,23\rho - 1,73 \cdot 10^{35} \rho^{31}$, $v_{\phi 4} = 31,28\rho - 1,73 \cdot 10^{35} \rho^{31}$, $v_{\phi 5} = 78,6\rho - 4,4 \cdot 10^{35} \rho^{31}$, $v_{\phi 6} = 2\pi f \rho$. (19)

Полагая среднюю скорость металла подобно (17) равной $v_{\phi s} = (v_{\phi n} + v_{\phi 1} + v_{\phi 2} + v_{\phi 3} + v_{\phi 4})/5 = 21,7\rho - 1,2 \cdot 10^{35} \rho^{31}$, (20)

по всей высоте перемешивателя, в результате численного решения уравнения (12) с начальной скоростью $v_{\phi n} = 0$, под воздействием найденной при этой скорости электродинамической силы по истечении 4 секунд найдем, что скорость вращения металла на выходе перемешивателя равна $v_{\phi} = 26\rho - 1,4 \cdot 10^{35} \rho^{31}$. (21)

Какая из этих зависимостей $v_{\phi 4}$ или v_{ϕ} по (21) более точно описывает распределение скорости вращения расплава на выходе перемешивателя на основе численных расчетов определить невозможно. Поэтому с удовлетворительной для технических расчетов точностью распределение азимутальной скорости вращения жидкого металла можно определить итерационными методами по формуле (14).

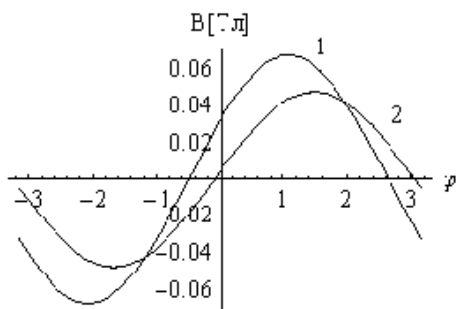


Рис. 4

Из рис. 2 и рис. 3 следует, что с ростом магнитной индукции в жидкости, что наблюдается в недовозбужденных синхронных перемешивателях (рис. 4), осуществляется более быстрый разгон расплава (рис. 3), и, следовательно, больший объем жидкого металла в пределах перемешивателя вращается с большей скоростью. Возможно с этим связаны предлагаемые некоторыми авторами требования ограничения величины магнитной индукции в жидком металле. Полученные зависимости показывают, что как при итерационных вычислениях, так и при определении скорости по средней скорости по высоте перемешивателя, скорость вращения жидкого металла не превышает скорость вращения магнитного поля. Поэтому для повышения скорости вращения металла необходимо повышать частоту тока питания перемешивателя. Однако вследствие процессов экранирования с ростом частоты магнитное поле в жидком металле ослабляется, и силовое воздействие его снижается. С этим связаны накладываемые на величину частоты ограничения. На рис. 5 показана зависимость максимального значения скорости вращения расплава на

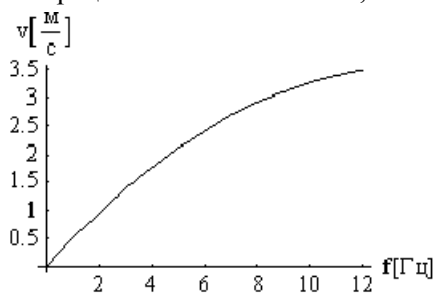


Рис. 5

При прочих равных условиях магнитное поле в гильзе кристаллизатора, непосредственно определяющее силовое воздействие на жидкий металл, существенным образом зависит от режима работы перемешивателя. На рис. 4 показано распределение радиальной составляющей индукции на внутренней поверхности гильзы кристаллизатора для принятого конструктивного исполнения перемешивателя в режимах недовозбуждения (кривая 1) и перевозбуждения (кривая 2). Как видно, при одинаковых магнитах и токах обмотки статора имеется возможность существенно повысить результирующее магнитное поле в жидком металле именно в режиме недовозбуждения.

Поэтому для повышения скорости вращения металла необходимо повышать частоту тока питания перемешивателя. Однако вследствие процессов экранирования с ростом частоты магнитное поле в жидком металле ослабляется, и силовое воздействие его снижается. С этим связаны накладываемые на величину частоты ограничения. На рис. 5 показана зависимость максимального значения скорости вращения расплава на

выходе перемешивателя от частоты тока питания статорной обмотки, которая приближенно описывается зависимостью $v_{\phi} = 0,52f - 0,02f^2$. Видно, что с увеличением частоты заметно снижается рост скорости вращения металла. При этом для обеспечения устойчивой работы синхронного привода следует повышать ток обмотки, который для заданного конструктивного исполнения кристаллизатора должен изменяться по закону $I_m = 45 + 8,75f$, А. Впрочем, большие ограничения на выбор частоты оказывает значительный рост мощности источника питания, изменение которой от частоты описывается зависимостью $S = 1,57f^{1,77}$, кВА. Вследствие увеличения джоулевых потерь в конструктивных элементах кристаллизатора с ростом частоты возрастает также активная мощность перемешивателя $P = 1,73f^{1,3}$, кВт. В общем случае для других конструктивных исполнений кристаллизатора и синхронного перемешивателя полученные зависимости могут несколько отличаться.

Выводы. 1. При одинаковых магнитах и токах обмотки статора существенно повысить результирующее магнитное поле в жидком металле можно лишь в режиме недовозбуждения.

2. Увеличение магнитной индукции в жидком металле приводит к увеличению силового воздействия на жидкий металл и повышению скорости его вращения.

3. Увеличение частоты тока питания синхронного перемешивателя приводит к некоторому повышению скорости вращения металла у фронта кристаллизации, но при этом резко возрастает потребляемая мощность перемешивателя и потери в конструктивных элементах кристаллизатора.

1. Виштак Т.В., Карлов А.Н., Кондратенко И.П., Ращепкин А.П. Магнитное поле токов статорной обмотки синхронного двигателя с полым ротором // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 5. – С. 41–46.

2. Дружинин Н.Н., Целиков А.А., Солодовник Ф.С. Улучшение качества непрерывнолитого слитка методом электромагнитного перемешивания // Сталь. – 1983. – № 9. – С. 28–30.

3. Кондратенко И.П., Ращепкин А.П., Виштак Т.В., Карлов А.Н. Магнитное поле системы возбуждения на постоянных магнитах синхронного двигателя с полым ротором // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 2. – С. 58–63.

4. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978. – 592 с.

ШВИДКІСТЬ ОБЕРТАННЯ РІДКОГО МЕТАЛУ В КРИСТАЛІЗАТОРІ З СИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПЕРЕМІШУВАЧЕМ

Т.В.Виштак, О.М.Карлов, І.П.Кондратенко, докт.техн.наук, А.П. Ращепкін, докт.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

e-mail: dep7ied@ukr.net

Розроблено ітераційний чисельно-аналітичний метод розрахунку розподілу швидкості обертання рідкого металу в кристалізаторі з синхронним електромагнітним перемішувачем. Наведено для прийнятого конструктивного виконання результати ілюстративних розрахунків швидкості обертання рідкого металу і встановлено функціональні залежності максимальної швидкості обертання металу біля фронту кристалізації на виході з перемішувача та його потужність від частоти струму живлення Бібл. 4, рис. 5.

Ключові слова: синхронний електромагнітний перемішувач, безперервне лиття, кристалізатор, швидкість обертання, рідкий метал.

ROTATIONAL SPEED OF LIQUID METAL IN THE MOLD WITH SYNCHRONOUS ELECTROMAGNETIC STIRRER

Vishtak T.V., Karlov O.M., Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P.

Institute Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremohy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,

e-mail: dep7ied@ukr.net

Developed an iterative numerical-analytical method for calculating the distribution of the rotational speed of the liquid metal in the mold with synchronous electromagnetic a stirrer. Because the time-averaged the azimuthal component of the bulk electrodynamic forces in the liquid metal during its acceleration depends on the speed, determination the time dependence of the rotational speed of the metal in the mold liner is performed by method of iteration. All other conditions being equal, the magnetic field in the mold sleeve, determining the force of the direct effect on the molten metal, essentially depends on the mode of the stirrer For an adopted design of the stirrer is retrieved the distribution of radial component of induction in modes of a underexcitation and overexcitation. It is shown that under the same magnets and stator currents, it is possible to significantly improve the resulting magnetic field in a liquid metal that is in the mode underexcitation. For the accepted embodiment of the mold shows the results of the illustrative calculations of the distribution of the rotational speed of the liquid metal and set the functional dependence of the maximum velocity of the metal near the crystallization front at the exit of the stirrer and him the power on the frequency a supply current References 4, figures 5.

Keywords: the electromagnetic stirrer, continuous casting, mold, rotational speed, the liquid metal.

1. Vishtak T.V., Karlov A.N., Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P. Magnetic field of currents a winding stator of the synchronous motor with hollow a rotor // Tekhnichna elektrodynamika. – 2013. – No 5. – Pp. 41–46. (Rus)

2. Druzhinin N.N., Tselikov A.A., Solodovnik F.S. Improving the quality of continuous casting ingot by electromagnetic stirring // Stal. – 1983. – No 9. – Pp. 28–30. (Rus)

3. Kondratenko I.P., Rashchepkin A.P., Vishtak T.V., Karlov A.N. Magnetic field the system excitation on permanent magnets of the synchronous motor with hollow a rotor // Tekhnichna elektrodynamika. – 2013. – No 2 – Pp. 58–83. (Rus)

4. Samarskii A.A., Nikolaev E.S. Methods for solving difference equations. – Moskva: Nauka, 1978. – 592 p. (Rus)

Надійшла 29.04.2013

Остаточний варіант 11.07.2013