

В.И.ДУБОДЕЛОВ, член-корр. НАН Украины, В.Н.ФИКССЕН, канд.техн.наук (Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев), А.И.ГЛУХЕНЬКИЙ, канд.техн.наук, Ю.М.ГОРИСЛАВЕЦ, докт.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев)

МГД перемешиватели алюминиевых сплавов с пульсирующим магнитным полем

Применительно к отражательным печам для плавки и приготовления алюминиевых сплавов выполнено компьютерное моделирование электромагнитных и гидродинамических процессов при перемешивании жидкого металла с помощью пульсирующих магнитных полей. Проведен сопоставительный анализ конструкций электромагнитных перемешивателей с пульсирующим и бегущим магнитными полями.

Для відбивних печей, що використовуються для плавки та приготування алюмінієвих сплавів, виконано комп'ютерне моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів при перемішуванні рідкого металу за допомогою пульсуючих магнітних полів. Проведено порівняльний аналіз конструкцій електромагнітних перемішувачів з пульсуючим магнітним полем і магнітним полем, що рухається.

Введение. В настоящее время для плавки и приготовления алюминиевых сплавов достаточно широко используются отражательные печи и миксеры. Для таких печей весьма актуальной является проблема механизации перемешивания расплава, которое в подавляющем большинстве случаев выполняется вручную. Помимо устранения тяжелого физического труда обслуживающего персонала в неблагоприятных экологических условиях литейного производства, использование перемешивателей позволяет также успешно решить ряд технологических задач, а именно: повысить производительность плавильной печи за счет интенсификации тепло- и массопереноса, снизить расход энергии на плавление и приготовление расплава, обеспечить высокую однородность расплава по химическому составу и температуре во всем объеме ванны печи, снизить перегрев и связанные с этим потери металла, улучшить качество продукции за счет интенсификации рафинирования расплава от вредных примесей натрия и водорода, снизить расход легирующих добавок, необходимых для приготовления сплавов [1].

В литейном производстве в качестве перемешивателей жидкого алюминия нашли применение погружные механические (фирма "Карборундум") [3] и электромагнитные ("Кайзер Алюминиум") [5] насосы, а также пристраиваемые к одной из стенок печи линейные индукторы бегущего магнитного поля [8]. Широко известный газодинамический метод перемешивания расплава [2], учитывая значительные размеры печей для плавки алюминия, является для них малоэффективным. Признано, что электромагнитные перемешиватели жидкого металла, называемые также магнитогидродинамическими (МГД) перемешивателями, обладают существенными преимуществами по отношению к

механическим, т.к. не содержат движущихся в алюминиевом расплаве деталей, которые сложны в обслуживании и быстро изнашиваются.

Учитывая тяжелые условия работы литейного оборудования (высокая температура и запыленность), одними из главных требований, предъявляемых к конструкции МГД перемешивателя, являются его простота и эксплуатационная надежность, а также возможность проведения ремонта в сжатые сроки. Отметим, что упрощение конструкции, даже в ущерб энергетическим характеристикам, является общей тенденцией при создании МГД устройств металлургического назначения.

Экспериментальные исследования. В Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины проведена опытная проверка эффективности МГД перемешивателя жидкого алюминия с пульсирующим магнитным полем. Пульсирующими в отличие от бегущих условно называют магнитные поля, создаваемые однофазным индуктором [6].

Конструкция перемешивателя с однофазным индуктором применительно к отражательным печам является предельно простой и, пожалуй, наиболее полно отвечает перечисленным ранее требованиям. Она содержит шихтованный ферромагнитный сердечник, на котором размещена многовитковая катушка. В случае пристыковки такого устройства (торцевой поверхностью сердечника) к боковой стенке печи в жидком металле индуцируются вихревые токи, которые, взаимодействуя с результирующим магнитным полем, обеспечивают силовое воздействие, преимущественно направленное нормально по отношению к боковой стенке ванны печи.

На первом этапе экспериментальные исследования выполнялись с использованием ванны и

фрагмента электромагнита (в качестве индуктора) магнитодинамического насоса для алюминия МДН-6А-160 [4]. Размеры ванны с жидким алюминием (в плане) составили 900x400 мм. Высота металла в ней — 250 мм. Индуктор с поперечным сечением сердечника $92 \times 67 \text{ мм}^2$ располагался по центру более длинной стенки ванны. По высоте верхняя плоскость сердечника находилась на 50 мм ниже уровня жидкого алюминия. В эксперименте индуктор подключался к фазному напряжению промышленной сети. Электрические параметры (напряжение, ток и мощность) измеряли прибором К540 (кл. 0,5). Характер движения жидкого алюминия фиксировался в поверхностном слое жидкого металла с помощью видеосъемки цифровым фотоаппаратом.

При расстоянии между торцом сердечника и внутренней поверхностью ванны $\Delta = 115 \text{ мм}$ показания прибора составили $U = 234 \text{ В}$, $I = 85 \text{ А}$, $P = 1800 \text{ Вт}$ в отсутствие металла и $U = 232 \text{ В}$, $I = 85 \text{ А}$, $P = 2000 \text{ Вт}$ — в ванне, заполненной металлом. Введение в жидкий алюминий весьма незначительной мощности ($2000 - 1800 = 200 \text{ Вт}$) при ампервитках катушки 11560 А вызвало заметное его перемещение. В горизонтальной плоскости наблюдалось двухконтурное движение жидкого металла, захватывающее центральные области ванны. Скорость в поверхностном слое, оцененная с помощью цифровой видеосъемки, достигала 10 см/с.

В дальнейшем был опробован более мощный индуктор перемешивателя с поперечным сечением сердечника $210 \times 180 \text{ мм}$. С его помощью в жидкий алюминий удалось ввести значительно большую мощность — порядка 2 кВт. При этом в ванне наблюдалось бурное движение жидкого металла. Предварительные замеры показали, что максимальная скорость алюминиевого расплава составляет 0,8 м/с.

Таким образом, опытным путем была показана принципиальная возможность перемешивания жидкого алюминия в прямоугольной ванне путем пристыковки к ее боковой поверхности перемешивателя, создающего пульсирующее магнитное поле промышленной частоты.

Постановка задачи. Движение жидкого металла в результате силового воздействия пульсирующего магнитного поля достаточно полно исследовано применительно к индукционным тигельным электропечам, индуктор которых в подавляющем большинстве случаев выполняется однофазным [6]. При этом силовое воздействие на жидкий металл и его движение являются сопутствующими индукционному нагреву факторами и подлежат учету при разработке таких печей. Так, для мощных печей промышленной частоты зачастую принимаются технические решения, направленные на ограничение чрезмерной интенсивности движения жидкого металла. Напротив, в печах с повышенной частотой питания индуктора и низкой интенсивностью движения металла устанавливают допол-

нительные электромагнитные перемешиватели (в основном бегущего магнитного поля).

Для отражательных печей, в которых плавление и нагрев металла обеспечивается либо за счет сгорания природного газа (пламенные печи), либо за счет выделения тепла в нагревательных элементах (электропечи сопротивления), конструкция и расположение электромагнитного перемешивателя в первую очередь должны определяться исходя из требуемого характера движения жидкого металла в ванне печи. Индукционный нагрев металла при этом является сопутствующим перемешиванию фактором. Здесь необходимо отметить, что оценка энергетической эффективности МГД устройств в металлургии, как правило, проводится без отнесения к потерям энергии электромагнитного поля, выделяющейся в жидком металле в виде тепла.

По отношению к индукционной тигельной печи геометрия ванны отражательной печи и конструкция индуктора пульсирующего поля имеют существенные особенности, что указывает на необходимость отдельного рассмотрения процесса МГД перемешивания в такой системе. Целью настоящей работы является расчетная оценка эффективности применения однофазных электромагнитных систем с пульсирующим магнитным полем для перемешивания жидкого алюминия в отражательных печах.

Расчетный анализ электромагнитных и гидродинамических процессов в данной работе производился численно с помощью пакета мультифизического моделирования Femlab 3.1 [10]. В расчетах использовалось безындукционное приближение, согласно которому электромагнитные и гидродинамические процессы рассматривались независимо друг от друга. При этом пренебрегали индуцированным за счет движения расплава электромагнитным полем. Как показали оценки, применение указанного приближения не вносит существенных погрешностей в результаты по сравнению с решением задачи в магнитогидродинамической постановке.

В системе "перемешиватель—ванна печи" электромагнитные и гидродинамические процессы рассматривались в двумерной постановке (в горизонтальной плоскости), как это показано на рис. 1. Такой подход соответствует процессу в бесконечно глубокой ванне печи, к боковой стенке которой пристыкован бесконечно широкий индуктор. Данная постановка задачи является достаточно грубым приближением как в электромагнитном, так и гидродинамическом отношениях, тем не менее она позволяет определить основные закономерности электромагнитного перемешивания жидкого металла в таких системах, выявить влияние на интенсивность его движения различных конструктивных факторов (формы сердечника перемешивателя, расстояния от индуктора до жидкого металла (зазора), расположения индуктора относительно ванны печи) и сопоставить с электро-

магнитными перемешивателями других типов. В отличие от электромагнитных устройств управления движением металла в индукционных тигельных печах [6], где в качестве одного из главных факторов оптимизации силового воздействия на жидкий металл рассматривается частота, в данном случае она принята постоянной (равной 50 Гц).

На рис. 1 в качестве примера представлена расчетная область электромагнитной задачи для случая индуктора пульсирующего поля с Ш-образным ферромагнитным сердечником. Она включает в себя подобласти сердечника (магнитопровода) Ω_1 , катушки индуктора Ω_2 и Ω_3 , окружающей индуктор воздушной среды и футеровки боковой стенки печи Ω_4 , а также жидкого металла в ванне печи Ω_5 .

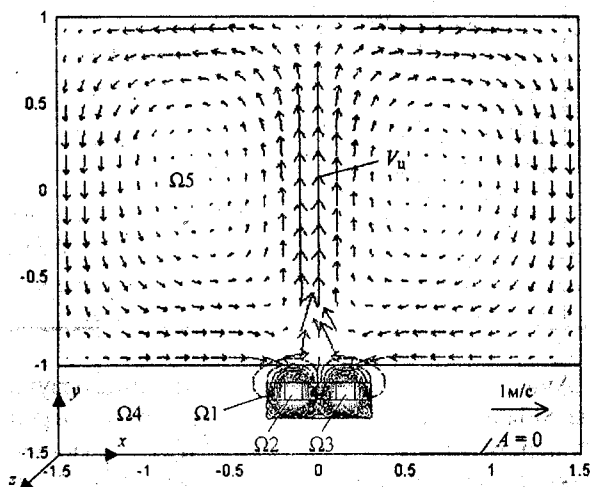


Рис. 1

Задача расчета электромагнитного поля решалась в линейной постановке при заданных ампервитках катушки электромагнита. Магнитопровод считался ненасыщенным, магнитная проницаемость ферромагнитного материала в расчетах принималась постоянной. Реальная неоднородная структура катушек, содержащая проводящие (проводники) и непроводящие (каркас катушек, изоляция) элементы, представлялась однородной непроводящей средой с равномерно распределенной заданной плотностью тока.

При таких упрощающих подходах и допущениях электромагнитное поле в устройстве можно описать следующей системой интегро-дифференциальных уравнений для единой компоненты векторного магнитного потенциала A_z (далее A):

$$\mu_0^{-1} \mu_r (\nabla \times \nabla \times A) = 0 \quad \text{— в области } \Omega_1; \quad (1)$$

$$\mu_0^{-1} (\nabla \times \nabla \times A) = \begin{cases} +Iw/S_2 & \text{— в области } \Omega_2; \\ -Iw/S_3 & \text{— в области } \Omega_3; \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_0^{-1} (\nabla \times \nabla \times A) = 0 \quad \text{— в области } \Omega_4; \quad (3)$$

$$\mu_0^{-1} (\nabla \times \nabla \times A) + j\omega\sigma A - j\omega\sigma S_5^{-1} \int_{S_5} A ds = 0 \quad \text{— в области } \Omega_5. \quad (4)$$

В этих уравнениях $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ_r — относительная магнитная проницаемость магнитопровода (в расчетах принято $\mu_r = 1000$), σ — удельная электропроводность жидкого алюминия ($\sigma = 4,46 \cdot 10^6$ (Ом·м)⁻¹), ω — угловая частота ($\omega = 2\pi \cdot 50 = 314$), Iw — ампервитки катушки электромагнита, S_n — площадь соответствующей под-области.

Вид уравнения (4), описывающего электромагнитное поле в проводящей среде, обеспечивает равенство нулю суммарного вихревого тока в жидком металле ($\int_{S_5} J ds = 0$, где J — плотность тока) [7]. В

связи с принятым безындукционным приближением составляющие, учитывающие движение металла, в уравнении (4) отсутствуют.

Гидродинамическая задача решалась для области Ω_5 (рис. 1), представляющей собой горизонтальное сечение ванны с жидким металлом. Скорость жидкого металла определяли путем численного решения уравнений Навье-Стокса для турбулентного течения (с k - ϵ моделью турбулентности [9]):

$$\rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \nabla (\eta_{\text{эфф}} \nabla \vec{u}) + \vec{f}; \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0, \quad (6)$$

где ρ — плотность жидкого металла, p — давление, $\eta_{\text{эфф}}$ — коэффициент эффективной динамической вязкости металла, \vec{f} — постоянные во времени объемные электромагнитные силы, которые рассчитывались на основании решения электромагнитной задачи

$$\vec{f} = 0,5 \text{Re} (\vec{J} \times \vec{B}^*), \quad (7)$$

где \vec{B}^* — сопряженный комплекс индукции магнитного поля.

В двумерной модели с электрическими токами, направленными перпендикулярно рассматриваемой плоскости (по координате z), электромагнитные силы в жидком металле имеют две пространственные составляющие f_x и f_y , направленные согласно рис. 1 соответственно тангенциально и нормально к боковой стенке ванны печи

$$f_x = -0,5 \text{Re} (\vec{J} \times \vec{B}_y^*), \quad (8)$$

$$f_y = 0,5 \text{Re} (\vec{J} \times \vec{B}_x^*). \quad (9)$$

Численное моделирование и анализ протекающих физических процессов выполнялись на примере отражательной печи для плавки и пригото-

ления алюминиевых сплавов с ванной размерами 2 на 3 метра (в плане). При заполнении ее жидким алюминием на глубину $h=0,5$ м емкость такой печи составляет 3 м^3 , что соответствует загрузке (с учетом удельной плотности жидкого алюминия $\rho=2400 \text{ кг/м}^3$) — 7,2 тонны.

На рис. 2 показаны различные варианты конструкций электромагнитных перемешивателей с основными размерами, которые в соответствии с представленной математической моделью были подвергнуты численному расчету и сопоставительному анализу. Рассматривались индукторы пульсирующего магнитного поля с линейным (рис. 2, а), П-образным (рис. 2, б) и Ш-образным (рис. 2, в) магнитопроводами, а также трехфазный одноволновой индуктор бегущего магнитного поля с намотанными вокруг ядра магнитопровода катушками (рис. 2, г). Во всех четырех случаях в качестве источника электромагнитного поля выступали суммарные ампервитки величиной $Iw=40000$ А (действующее значение). Для первого и третьего случая они концентрировались в одной катушке, для второго и четвертого случая соответственно распределялись по двум и шести катушкам. В первых трех случаях питание обмоток было однофазным, в четвертом — трехфазным с фазовым сдвигом между катушками в 60 эл. градусов. Расстояние (зазор) между жидким металлом и магнитопроводом перемешивателя во всех случаях принималось одинаковым ($\Delta=100$ мм).

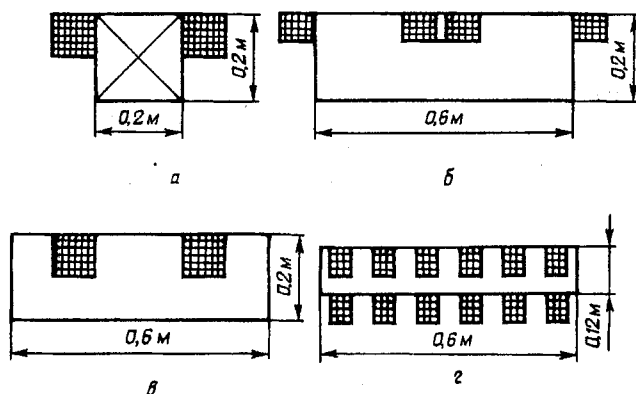


Рис. 2

Обсуждение результатов. Полученные в результате расчетов параметры, характеризующие эффективность электромагнитного перемешивателя, сведены в таблицу, где $F_x = h \int f_x ds$ и

$F_y = h \int f_y ds$ — интегральные силы, действующие на жидкий металл (тангенциальные и нормальные к боковой поверхности расплава составляющие);

$Q = 0,5h \int \sigma^{-1} j^2 ds$ — мощность тепловыделения в жидком металле от вихревых токов; $V_{\text{ц}}$ — максимальная скорость потока в центре ванны (для двух-

контурного течения); $N = h \int u_n dl$ — объемная производительность перемешивания жидкого металла, определяемая путем интегрирования нормальной составляющей скорости вдоль линии между центрами вихрей для двухконтурного течения либо между центром вихря и боковой стенкой печи в случае одноконтурного движения. Для двухконтурного движения жидкого металла (п.п.1—5 таблицы) в качестве интегральной тангенциальной силы F_x представлены ее значения (со звездочкой) в одной половине ванны (правой). Значение F_x в целом по ванне с учетом симметричности электромагнитного поля относительно центра магнита в этих случаях равно нулю.

№	F_y , Н	F_x , Н	Q , кВт	$V_{\text{ц}}$, м/с	N , м ³ /с	Прим.
1	798	5*	8,6	0,31	0,08	рис. 2, а
2	1190	14*	12,9	0,53	0,13	рис. 2, б
3	1980	19*	21,5	0,51	0,14	рис. 2, в
4	1980	19*	21,5	0,62	0,16	рис. 2, в, $f_x=0$
5	1985	19*	21,5	0,35	0,09	рис. 2, в по центру короткой стороны
6	1984	-23	22,1	-	0,08	рис. 2, в, в углу
7	214	60	2,3	-	0,11	рис. 2, г

Анализируя представленные в таблице результаты, можно сделать вывод, что среди рассмотренных перемешивателей на основе пульсирующего магнитного поля наименее эффективной является конструкция перемешивателя с линейным магнитопроводом (п.1 таблицы). Отсутствие ферромагнитных путей для замыкания магнитного потока вокруг катушки вне жидкого металла и стенок печи ослабляет магнитное поле индуктора. Интегральная нормальная сила F_y в этом случае практически в 2,5, а производительность перемешивания расплава N в 1,7 раза ниже, чем при Ш-образном магнитопроводе (п.3).

Сопоставление между собой перемешивателей с П- (п.2) и Ш-образными сердечниками показывает, что, несмотря на весьма существенную разницу как по мощности тепловыделений Q , так и по силе F_y (в 1,7 раз большие в случае Ш-образного сердечника), производительность перемешивания N у них примерно одинаковая.

На рис. 3 для этих двух перемешивателей показано распределение по координате x составляющих электромагнитной силы f_x и f_y у боковой стенки печи. Как видно, в жидком металле преобладают нормальные к поверхности электромагнитные силы f_y , которые более чем на порядок (по максимальным значениям) превышают тангенциальные силы f_x . При Ш-образном сердечнике (сплошные кривые) распределение сил f_y вдоль стенки имеет "двугорбый" характер, а при П-образном сердечнике (пунктирные кривые) эти силы хоть и меньше по величине, но сосредоточены в основном в одной

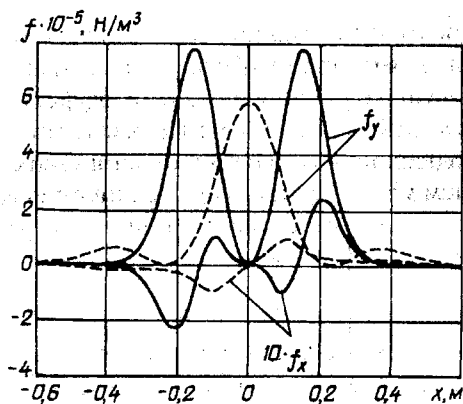


Рис. 3

зоне (на участке между кернами электромагнита). Тем самым, концентрация электромагнитных сил компенсирует количественную разницу в их величине, и в результате обеспечивается примерно одинаковая гидродинамическая эффективность этих перемешивателей.

Величины как нормальной, так и тангенциальной составляющих электромагнитных сил для рассмотренных случаев убывают вглубь жидкого металла (по координате y) по закону $f(y) = f_0 \exp(-y/\xi_1)$, где f_0 — величина электромагнитных сил на поверхности расплава, $\xi_1 = 0,018$ м — определенная по результатам расчетов электромагнитных сил величина знаменателя показателя экспоненты. Величина ξ_1 приблизительно в два раза меньше глубины проникновения электромагнитного поля в проводящую среду $\xi = (2 / (\sigma \mu_0 \omega))^{0,5}$, которая для жидкого алюминия при $\omega = 314$ рад/с и $\sigma = 4,46 \cdot 10^6$ (Ом·м)⁻¹ равна 0,0337 м.

Хотя тангенциальные силы в рассмотренных системах относительно малы и не создают интегральной электромагнитной силы, их учет в гидродинамическом расчете может привести к существенному искажению результатов. К примеру, в случае Ш-образного сердечника пренебрежение ними (задание в гидродинамическом расчете $f_x = 0$) приводит к существенному завышению интенсивности движения (примерно на 20 %) относительно реального распределения сил f_x (пп. 4 и 3 таблицы). Это обусловлено тем, что в каждом из двух вихрей результирующие тангенциальные силы направлены встречно вихревому движению металла и значительно его ослабляют.

Расположение электромагнитного перемешивателя с Ш-образным сердечником по центру короткой стороны перемешивателя (п.5 таблицы), либо вблизи угла ванны печи (п.6), снижает гидродинамическую эффективность перемешивателя по отношению к расположению его по центру длинной стороны (п.3). При угловом размещении перемешивателя в ванне печи устанавливается одно-

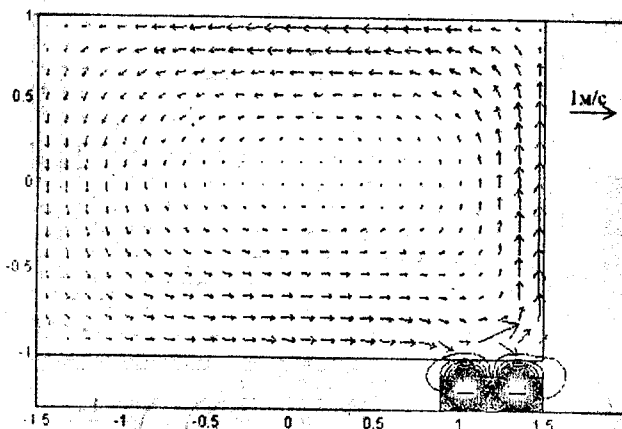


Рис. 4

контурное течение жидкого металла, картина которого показана на рис. 4.

Таким образом, в зависимости от расположения электромагнитного перемешивателя с пульсирующим электромагнитным полем относительно боковой стенки печи (по центру либо с края) в ванне может образовываться двухконтурное либо одноконтурное вихревое движение жидкого металла. Однако следует отметить, что двухконтурное движение является не только более интенсивным, но и, по нашему мнению, в большей степени соответствует технологическим требованиям, так как при этом в перемешивание вовлекаются и центральные объемы металла.

Особый интерес представляет сопоставление между собой перемешивателей жидкого металла на основе пульсирующего и бегущего магнитных полей. На рис. 5 показано распределение нормальной f_x и f_y тангенциальной составляющих электромагнитных сил вдоль боковой стенки печи, которые наведены в жидком металле индуктором бегущего поля, представленным на рис. 2, з. Несмотря на то, что в жидком металле преобладают нормальные к стенке печи электромагнитные силы, тем не менее, течение металла в ванне в этом случае определяется в основном действием тангенциальных сил, которые создают одноконтурное движение жидкого металла (рис. 6).

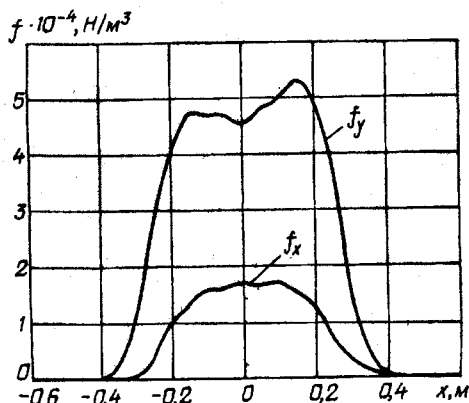


Рис. 5

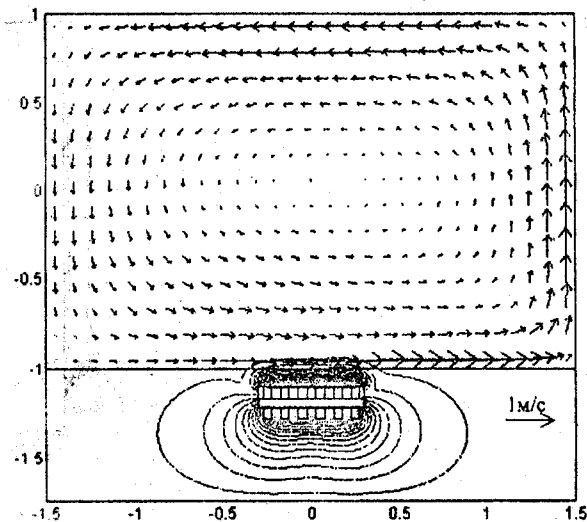


Рис. 6

При тех же ампервитках производительность N рассмотренной конструкции перемешивателя с бегущим полем (п.7 таблицы) на 20% меньше, чем в случае однофазного индуктора с Ш-образным магнитопроводом (п.3), что является достаточно неожиданным результатом. Интересно также отметить, что при сопоставимых, в общем-то, гидродинамических параметрах уровень как электромагнитных сил, так и тепловыделений в жидком металле в случае 3-х фазного индуктора почти на порядок ниже.

Выводы. 1. Использование в отражательных печах для плавки и приготовления алюминиевых сплавов в качестве электромагнитных перемешивателей однофазных индукторов, создающих пульсирующее магнитное поле, позволяет организовать в ванне печи эффективное двухконтурное перемешивание жидкого металла.

2. Электромагнитные перемешиватели с пульсирующим полем необходимо размещать по центру длинных сторон боковых стенок ванны печи.

3. Конструкции перемешивателей с П- и Ш-образным магнитопроводами, несмотря на суще-

ственную разницу в силовом и тепловом воздействии на жидкий металл, обеспечивают практически одинаковую гидродинамическую эффективность его перемешивания. При одинаковых ампервитках производительность перемешивания таких систем выше, чем у трехфазного перемешивателя бегущего магнитного поля с намотанной через ярмо магнитопровода обмоткой.

1. Дубоделов В.И., Фиксен В.Н., Горюк М.С., Слажнев Н.А., Скоробазатко Ю.П. Современные устройства для электромагнитного перемешивания алюминиевых расплавов в печах и миксерах повышенной емкости // *Металл и литье Украины*. — 2008. — №5.

2. Макаров Г.С. Рафинирование алюминиевых сплавов газами. — М.: *Металлургия*, 1983. — 120 с.

3. *Насосы для перекачки жидких металлов* (комплект технических материалов "The Carborundum Company Refractories & Electronics Division Metallurgic Branch" (США)). — М.: ВО "Лицензинторг"; Киев: ИПЛ АН УССР. — 1974.

4. Полищук В.П., Цин М.Р., Горн Р.К. и др. *Магнитодинамические насосы для жидких металлов*. — К.: *Наук. думка*, 1989. — 256 с.

5. *Производство легких металлов и сплавов*. // *Экспресс-информация. Цветная металлургия*. — 1974. — № 20.

6. Тур Л.Л., Столов М.Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах: 2-ое изд., перераб. и доп. — М.: *Металлургия*, 1991. — 280 с.

7. Konrad A. Integrodifferential finite element formulation of two-dimensional steady-state skin effect problems // *IEEE Trans. Magn.* — Vol. MAG-18. — 1982. — №1. — Pp. 284—292.

8. *Non ferrous casting — Equipment MHD Technology*. — Riga, Latvia: *Krasainie Iejumi*. — 2004.

9. Wilcox D.C. *Turbulence Modeling for CFD* // *DCW Industries Inc.* — 1998.

10. *FEMLAB User's Guide and Introduction*. — *FEMLAB 2.3*. — *COMSOL, Inc.*, 1994—2002. — 436 p.

Надійшла 14.07.2008