

УДК 621.74 : 537.84

Дубоделов В. И., Фикссен В. Н., Слажнев Н. А., Горшков А. О.

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ПЛАВКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ БОЛЬШОЙ ВМЕСТИМОСТИ

На сегодня, практически все современные электромагнитные перемешиватели (ЭМП), устанавливаемые на большегрузных плавильных отражательных печах и миксерах для алюминия и его сплавов, представляют собой многофазные (как правило, трехфазные) устройства бегущего магнитного поля, изготавливаемые различными компаниями в разных странах мира [1–3]. Эти перемешиватели, в зависимости от конструктивного исполнения, устанавливаются на боковой стенке печи или под ее днищем. Они успешно применяются на ряде предприятий по производству алюминиевых сплавов.

Применение ЭМП позволяет: повысить производительность плавильной печи; сократить время приготовления сплавов и уменьшить количество коррекций химического состава; снизить расход энергии; обеспечить высокую гомогенность химического состава расплава; ликвидировать чрезмерный перегрев металла в отдельных зонах печи и обеспечить выравнивание температуры жидкого металла по всему объему печи; снизить угар металла.

Однако, по нашему мнению, электромагнитные перемешиватели бегущего магнитного поля (ЭМП-БМП) имеют ряд недостатков, ограничивающих эффективность технологии: 1) относительная сложность конструкции (многофазная электромагнитная система со сложными по конфигурации магнитопроводом и обмотками), что создает определенные трудности при изготовлении, эксплуатации и обслуживании устройства; 2) ввиду больших немагнитных зазоров, при донном и иногда при боковом размещении ЭМП-БМП он должен питаться током низкой частоты – 1–5 Гц [1], что существенно ужесточает требования к системе электропитания (или же, при использовании перемешивателей бегущего магнитного поля, питающегося током частоты 50–60 Гц [2], индуктор располагают в стенке печи на расстоянии 60–100 мм от жидкого металла); 3) стоимость ЭМП-БМП, в том числе и вследствие вышеперечисленных особенностей конструкции, достаточно велика – не менее 150 тыс. евро; 4) физическая природа бегущего магнитного поля такова, что генерируемое им движение является однонаправленным (возможно лишь изменение направления на противоположное при реверсировании перемешивателя) и вовлекает в движение в первую очередь расплав вдоль стенок печи, оставляя малоподвижным центр жидкометаллической ванны. При этом остальные слои металла, в первую очередь – в вертикальной плоскости – вовлекаются в движение не электромагнитными силами, а за счет малоэффективных гидродинамических эффектов.

Специалистами Физико-технологического института металлов и сплавов Национальной академии наук Украины предложен электромагнитный перемешиватель, основанный на использовании пульсирующего магнитного поля [4]. Он представляет собой однофазную электромагнитную систему и располагается на боковой стенке печного агрегата с алюминием. При пропускании по обмотке синусоидального тока возникает магнитное поле, вектор индукции которого изменяется (пульсирует) в жидком металле также по синусоидальному закону.

Следует отметить, что ранее делались попытки использовать подобные электромагнитные системы. Так, компанией Otto Junker GmbH был создан специализированный агрегат – так называемый высокотурбулентный миксер НТМ (High Turbulence Mixer) [5–7]. В нем используется многофазная электромагнитная система, включающая в себя Ш-образный разомкнутый магнитопровод и три катушки, установленные на каждый из его полюсов. Вся эта система

располагается вертикально по стенке печи или миксера с расплавом. В этом случае силовые линии магнитного поля замыкаются в расплаве и обеспечивают его перемешивание в различных плоскостях, а интенсивность движения жидкого металла определяется подведенной к ЭМП мощностью. Однако, по нашему мнению, несмотря на более простую конструкцию этого перемешивателя по сравнению с перемешивателями бегущего магнитного поля, его конструкция несовершенна. Дело в том, что каждая обмотка такого ЭМП охватывает лишь один полюс магнитопровода и создает пульсирующее магнитное поле. В результате, пульсирующие электромагнитные поля, сгенерированные каждой обмоткой с полюсом, взаимодействуют друг с другом и образуют результирующее поле, по своей физической природе также являющееся бегущим магнитным полем, но его энергетические, силовые и гидродинамические параметры значительно уступают параметрам поля, создаваемого ЭМП-БМП классической конструкции. Вследствие этого, эффективность перемешивания металлического расплава существенно снижается.

Отличительными особенностями пульсирующего магнитного поля, по сравнению с бегущим, являются: возможность его создания однофазной электромагнитной системой; распространение поля не вдоль магнитопровода системы, а в виде «снопа» по отношению к полюсу. Кроме того, по данным [6], пульсирующее электромагнитное поле может эффективно применяться для перемешивания не только алюминиевых расплавов, но и сплавов других металлов, в частности, чугуна.

Таким образом, на основании предварительных оценок можно утверждать, что электромагнитные перемешиватели пульсирующего магнитного поля (ЭМП-ПМП) по сравнению с аналогичными устройствами бегущего поля являются более простыми в изготовлении и при эксплуатации и способны обеспечить необходимые режимы перемешивания расплава. Также следует ожидать, что предполагаемая стоимость ЭМП-ПМП будет в 2–3 раза ниже, чем их аналогов, использующих бегущее магнитное поле. Это обуславливает перспективность их использования для перемешивания алюминиевых расплавов.

Целью работы является исследование экспериментального электромагнитного перемешивателя пульсирующего магнитного поля для перемешивания алюминиевых расплавов в печах и миксерах. Исследования проводились с использованием методов физического и математического моделирования.

Экспериментальный образец ЭМП-ПМП для физического моделирования процесса перемешивания алюминиевого расплава был спроектирован и изготовлен во ФТИМС НАН Украины. Он представляет собой однофазную электромагнитную систему. Напряжение питания перемешивателя – 0–240 В, частота тока – 50 Гц, максимальная электрическая мощность – 19 кВт, максимальная индукция на полюсе магнитопровода – 0,3 Тл. Перемешиватель был установлен на тигле, заполненном алюминиевым расплавом с температурой 700–750 °С в количестве 300 кг, и располагался на его длинной стороне по центру как по высоте, так и по длине относительно жидкометаллической ванны (рис. 1). Расстояние от полюса ЭМП-ПМП до расплава составило 135 мм, при этом индукция магнитного поля на таком расстоянии от полюса составляла 0,06 Тл.

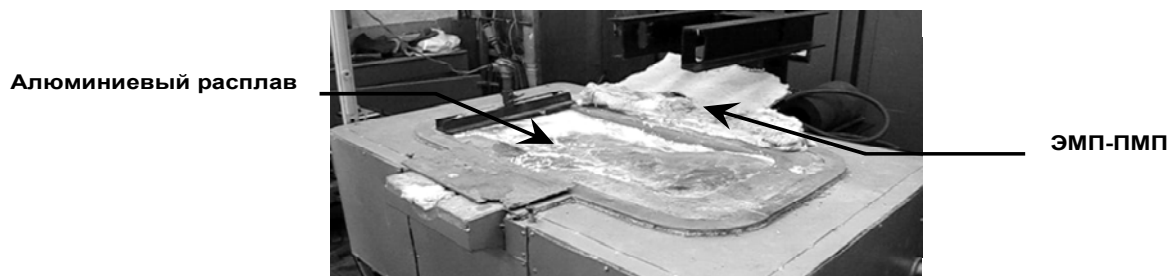


Рис. 1. Физическая модель для изучения процесса перемешивания алюминиевого расплава пульсирующим магнитным полем, создаваемым экспериментальным ЭМП

На начальном этапе исследований стояла задача изучения распределения скоростей в жидкометаллической ванне при наложении внешнего магнитного поля, генерируемого ЭМП-ПМП. Для измерения скорости движения металла использовали устройство, осуществляющее регистрацию движения металла по принципу трубки Пито высотой 400 мм и с внутренним диаметром 22 мм, на нижнем торце которой приварен патрубок, расположенный перпендикулярно оси трубки и направленный навстречу потоку металла (рис. 2, 3). Для определения картины распределения скоростей движения металла в тигле установки, в экспериментах производили измерения в вертикальной и горизонтальной плоскостях относительно осей полюса ЭМП. При измерениях использовали цилиндрическую систему координат, перемещая измерительную трубку в вертикальной плоскости с шагом 50 мм и в горизонтальной плоскости с шагом по углу 10° ($-30^\circ \dots +30^\circ$) и шагом по радиусу 50 мм.

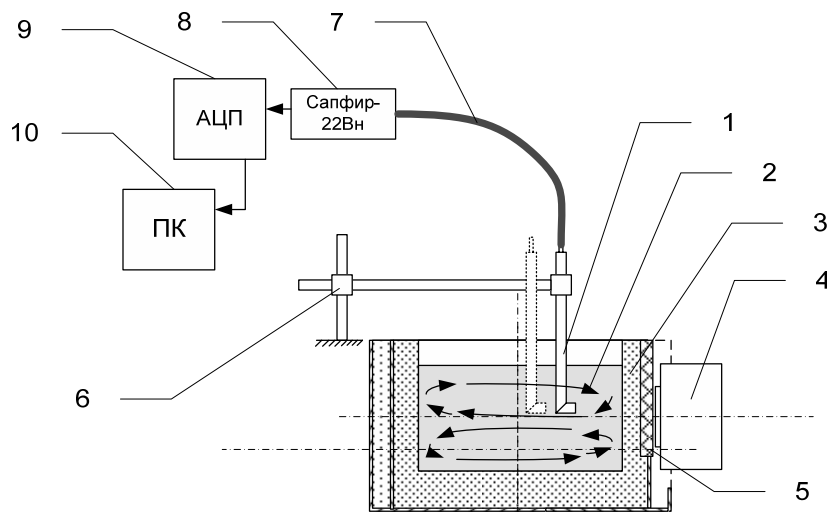


Рис. 2. Общая схема измерения скорости движения жидкого алюминиевого сплава под действием пульсирующего магнитного поля, создаваемого экспериментальным ЭМП-ПМП:

1 – измерительная трубка; 2 – расплав и направления его движения; 3 – огнеупорная стенка; 4 – ЭМП-ПМП; 5 – немагнитная вставка; 6 – штатив для крепления измерительной трубки; 7 – герметичный шланг; 8 – преобразователь давления; 9 – аналогово-цифровой преобразователь; 10 – персональный компьютер

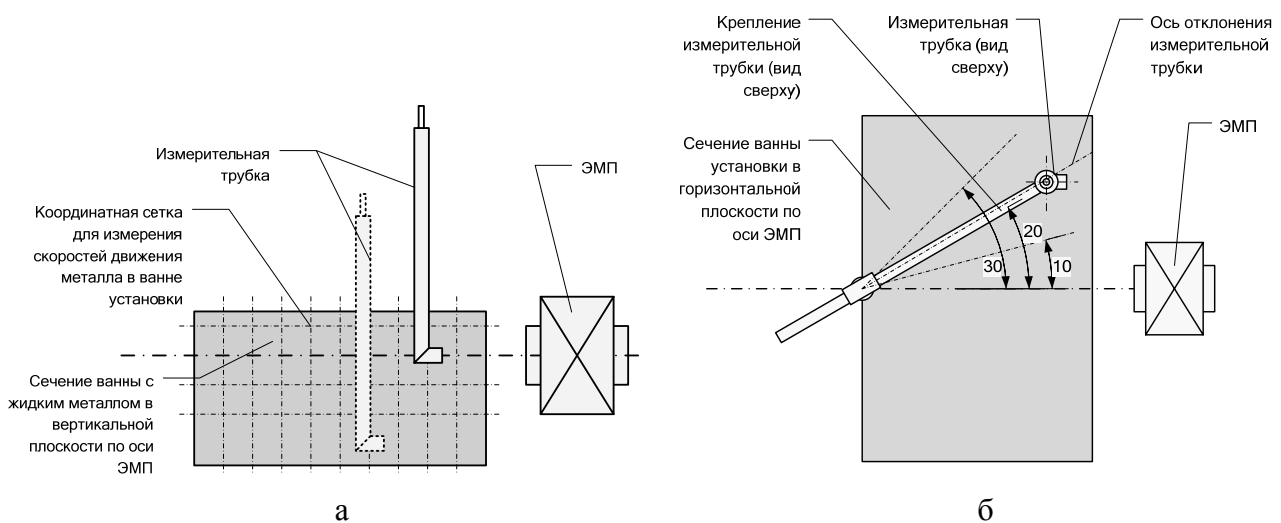


Рис. 3. Схема измерения скоростей движения металла в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях с использованием цилиндрической системы координат

При подъеме столба металла в трубке создаваемое в ней избыточное газовое давление передавалось через герметичный шланг тензометрическому датчику давления, расположенному в преобразователе давления. На выходе преобразователя газового давления генерировался аналоговый электрический сигнал, пропорциональный действующему на датчик газовому давлению. Этот сигнал далее поступал на вход аналогово-цифрового преобразователя и в цифровом виде записывался на запоминающее устройство (персональный компьютер) в виде массива данных, сформированного как зависимость выходного электрического сигнала от времени.

Так как скорость движения металла в ванне установки прямо пропорциональна создаваемому на торце измерительной трубки избыточному давлению металла, высоте подъема столба металла в измерительной трубке и собственно избыточному газовому давлению, действующему на мембрану датчика давления в преобразователе давления, то, получаемый на выходе электронного блока преобразователя давления электрический сигнал, после его оцифровки и записи в вид массива данных в персональный компьютер, путем несложных математических преобразований, можно перевести в скорость движения металла.

Для условия использования трубки Пито в качестве регистрирующего прибора, исходя из условия равенства скоростной высоты и скоростного напора, упрощенная зависимость скорости движения жидкости равна [8]:

$$h = v^2 / 2g, \quad (1)$$

где h – высота подъема металла (жидкости) в измерительной трубке, м; v – скорость движения жидкости (расплава) в ванне, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с² ($g = 9,8 \text{ м/с}^2$).

Кроме того, высота подъема жидкости в измерительной трубке зависит от:

$$h = p / \rho g, \quad (2)$$

где p – металлостатическое давление, Па; ρ – плотность расплава, кг/м³.

Исходя из (1) и (2) и согласно [8] на основании уравнения Бернулли с учетом поправочного коэффициента ξ (обычно $\xi \approx 1$), скорость несжимаемой жидкости равна:

$$v = \sqrt{2\xi p / \rho}. \quad (3)$$

Результаты пересчета скорости жидкого алюминиевого сплава, перемешиваемого экспериментальным ЭМП-ПМП, приведены в табл. 1 (для вертикальной плоскости) и на рис. 4 (для горизонтальной).

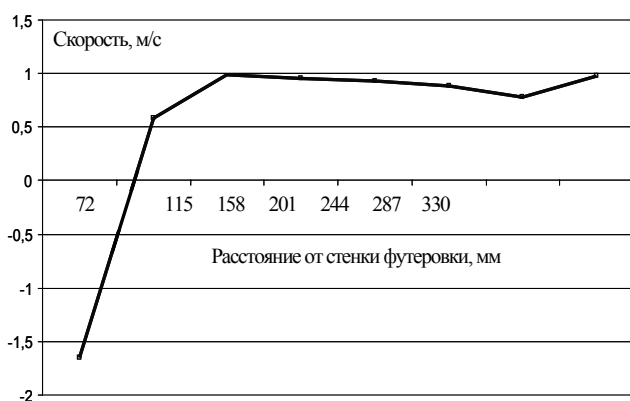
Отрицательные значения скорости в табл. 1 и на рис. 4 свидетельствуют о том, что наблюдается всасывание расплава к стенке, вблизи которой установлен ЭМП-П МП, в результате чего образуются вихри, обеспечивающие перемешивание расплава не только в горизонтальной, но и в вертикальной плоскостях. Скорость расплава в ядре потока достигала 1 м/с. Расчет показал, что в ванне большей вместимости такая скорость будет сохраняться на расстоянии не менее 1,2 м от стенки печи, у которой расположен перемешиватель.

Исследовано влияние расстояния от полюса перемешивателя до жидкого металла на скорость жидкого алюминия в ядре потока. Показано, что критическим значением этой величины для данного однополюсного ПМП является расстояние в 200 мм, так как при этом скорость расплава снижается в три раза. Для сравнения отметим, что, как уже указывалось выше, при использовании перемешивателей бегущего магнитного поля индуктор в стенке печи, как правило, располагают в 60–100 мм от жидкого металла.

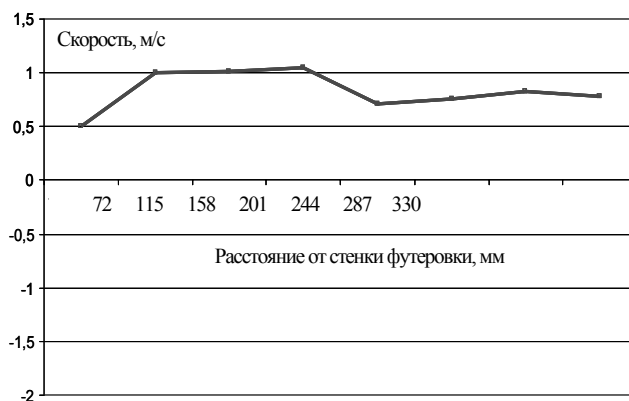
Таблица 1

Распределение скорости движения металла в вертикальной плоскости (см. рис. 3, а) по оси полюса перемешивателя

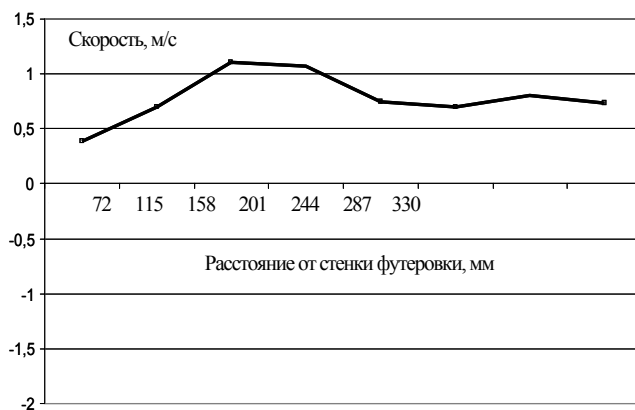
Скорость движения металла, м/с								
Расстояние относительно оси полюса электромагнита по вертикали, мм	Расстояние от футеровки стенки тигля, мм							
	50	100	150	200	250	300	350	400
50	-1,45	-1,66	-1,08	0,63	0,18	0,65	0,80	-0,50
0 (центр полюса)	-1,65	0,59	0,99	0,95	0,93	0,88	0,78	0,98
-50	-2,34	-0,69	0,93	1,08	0,95	0,96	0,96	0,76
-100	-1,77	1,05	1,17	1,07	0,87	0,90	0,82	0,70



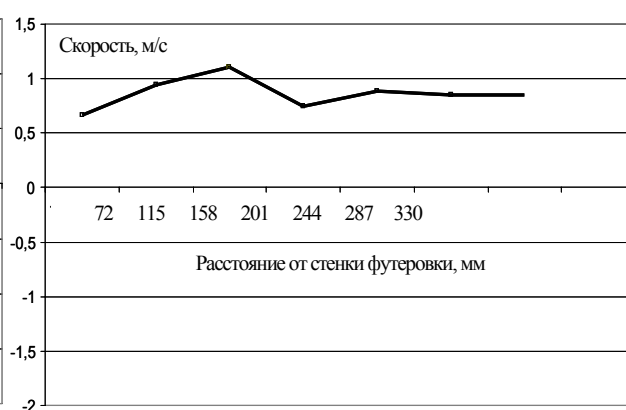
а



б



в



г

Рис. 4. Зависимость скорости движения металла от расстояния от стенки футеровки в горизонтальной плоскости электромагнитного перемешивателя (см. рис. 3, б): а – 0° отклонения от оси перемешивателя; б – 10°; в – 20°; г – 30°

Математическое моделирование для решения поставленной задачи производилось совместно со специалистами Института электродинамики НАН Украины [9] с помощью пакета «Femlab 3.1» [10].

Моделировали однофазный ЭМП-ПМП с различными по форме магнитопроводами – Т-, U- и Ш-образным – при его работе на отражательной печи с размерами жидкометаллической

ванны $2000 \times 3000 \times 500$ мм, что соответствует загрузке печи жидким алюминием массой около 7,2 т при различном расположении перемешивателя – по центру (по высоте и длине) длинной стороны печи и в углу печи (центр по высоте).

Установлено, что принципиальное отличие между бегущим и пульсирующим полем состоит в следующем. В обоих случаях перемешиватель создает тангенциальные и нормальные электромагнитные силы. Однако, в случае бегущего магнитного поля силами, определяющими характер движения металла, являются тангенциальные силы (направленные параллельно поверхности полюса перемешивателя), сообщающие ему одноконтурное перемешивание (с возможностью смены направления на противоположное) только в горизонтальной плоскости.

Напротив, при пульсирующем магнитном поле ответственными за характер движения металла становятся нормальные силы (направленные перпендикулярно к поверхности полюса). При этом в случае углового расположения перемешивателя, создается также одноконтурное перемешивание расплава. Однако при расположении ЭМП-ПМП на длинной боковой стенки печи в ее центре по высоте и длине создается двухконтурное перемешивание, что в большей степени соответствует технологическим требованиям по гомогенизации расплава по температуре и химическому составу при плавке и приготовлении жидких алюминиевых сплавов. Согласно расчетным данным, производительность ЭМП-ПМП примерно на 20 % выше, чем у ЭМП-БМП с теми же параметрами индукционной обмотки (количество ампервитков, напряжение и частота питания и др.) [9].

ВЫВОДЫ

Экспериментальные исследования с использованием методов физического и математического моделирования показывают перспективность применения электромагнитных перемешивателей пульсирующего магнитного поля для перемешивания алюминиевых расплавов в отражательных плавильных печах и миксерах вместимостью 5–20 т. В случае успешного испытания этих перемешивателей в производственных условиях появится возможность их широкого применения на промышленных предприятиях благодаря простоте их конструкции, эксплуатации и технического обслуживания, а также относительно низкой стоимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Официальный веб-сайт ABB Group [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.abb.com.
2. Non ferrous casting – Equipment MHD Technology / Krāsainie lējumi, Rīga; Latvia, 2004.
3. Официальный веб-сайт Научно-производственного центра магнитной гидродинамики. – Красноярск, Россия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://nrcmgd.com>.
4. Дубоделов В. И. Современные устройства для электромагнитного перемешивания алюминиевых расплавов в печах и миксерах повышенной емкости / В. И. Дубоделов, В. Н. Фикссен, М. С. Горюк // *Металл и литье Украины*. – 2008. – № 6. – С. 12–18.
5. European patent No. EP-B1 0 252 308. Verfahren zum Behandeln von Metallschmelzen und Vorrichtung zum Durchführen des Verfahrens, submitted on June 6th, 1987. Patent owner : Centrem S. A.
6. A new reactor for the ironmaking and foundry industries / H. W. Gudenau, H.-G. Rachner, W.-D. Schneider, and P. Metz. // *Metallurgical Plant and Technology International*. – 1993. – No. 16. – P. 50–54.
7. Schmitz W. The HTM (High Turbulence Mixer) process and its application in the metallurgical industry / *Proceedings of the International Congress on Electromagnetic Processing of Materials*. – Paris-La-Defense, France, May 27-29, 1997. – V. 1. – P. 55–60.
8. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М. : Машиностроение, 1975. – 560 с.
9. Дубоделов В. И. МГД перемешиватели алюминиевых сплавов с пульсирующим магнитным полем / В. И. Дубоделов, В. Н. Фикссен, А. И. Глухенький, Ю. М. Гориславец // *Технічна електродинаміка*. – 2009. – № 1. – С. 61–66.
10. FEMLAB User's Guide and Introduction. – COMSOL, Inc., 1994–2002. – 436 p.