

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЕЙ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

*А. Н. Карлов, инж., И. П. Кондратенко, д.т.н., проф., А. П. Ращепкин, д.т.н., проф.
Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев
просп. Победы, 56, 03680, г. Киев, Украина
E-mail: dep7ied@ukr.net*

Проведен анализ энергетических показателей двухполюсных магнитоэлектрических перемешивателей жидкого металла в кристаллизаторе машин непрерывного литья заготовок с разным исполнением магнитных систем. Исследованы четыре варианта магнитных систем. Для определения эффективности магнитных систем в качестве критериев используются: электромагнитный момент жидкого металла, индукция в центре кристаллизатора, электромагнитная мощность.

Ключевые слова: перемешиватель жидкого металла, кристаллизатор, постоянные магниты.

Введение. Конкуренция металлургических предприятий Украины с зарубежными сталеплавильными фирмами на международном рынке требует проведения технической модернизации производства для удешевления продукции и улучшения ее качества. Для этих целей используется перемешивание жидкого металла в кристаллизаторе машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

Электромагнитный перемешиватель жидкого металла представляет собой статор электрической машины переменного тока, питающийся от преобразователя низкой частоты порядка 3-6 Гц. Перемешивание жидкого металла в кристаллизаторе происходит за счет силового взаимодействия результирующего магнитного поля и индуцированных вращающимся магнитным полем токов в жидком металле.

Анализ предыдущих исследований. Применение электромагнитных перемешивателей (ЭМП) в МНЛЗ позволяет уменьшить количество пор и раковин в металле, а также количество шлаковых включений, увеличить скорость литья, создать равномерный профиль распределения температуры в металле, получить более однородную структуру металла и т. д. [0,0, 0].

У применяемых в настоящее время ЭМП основным недостатком являются большие реактивные токи, вызванные наличием большого воздушного зазора. Этот недостаток отсутствует у перемешивателей жидкого металла на постоянных магнитах из композита Nd-Fe-B [0]. Основной составляющей стоимости перемешивателя является стоимость магнитов.

Принцип действия таких перемешивателей основан на вращении магнитной системы с заданной скоростью. При этом потребляемая мощность привода оказывается намного меньше мощности низкочастотных преобразователей ЭМП обычного исполнения.

В данной работе рассматриваются варианты двухполюсных перемешивателей как более перспективных по сравнению с многополюсными.

Цель работы. Разработать рекомендации по выбору конструктивного исполнения и основных активных размеров двухполюсного перемешивателя жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ на постоянных магнитах.

Материал и результаты исследования. С целью определения оптимальной конфигурации и размеров

полюсов проведено численное моделирование в двумерной постановке силового воздействия магнитного поля на жидкий металл. При этом гидродинамические процессы в жидком металле не учитываются.

На рис. 1 представлены конфигурации исследуемых магнитных систем и распределение магнитного поля в них. Размеры перемешивателя представлены в табл. 1.

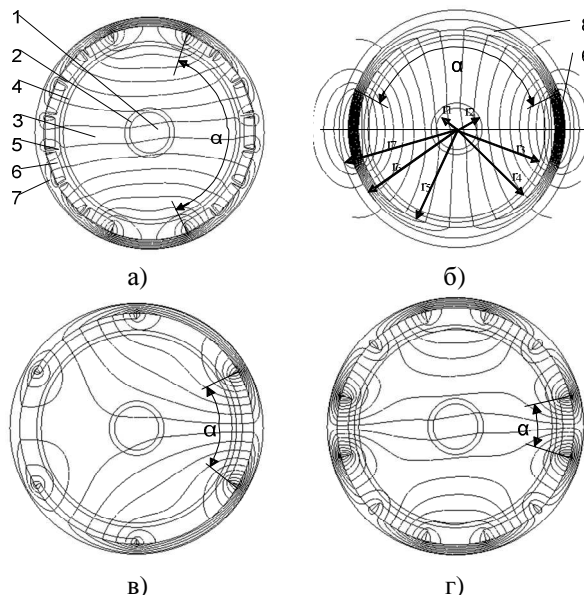


Рисунок 1 – Распределение магнитного поля при разных конфигурациях магнитных систем

На рис. 1 представлены разные исполнения перемешивателей: а – перемешиватель обычного исполнения с сегментированными полюсами, соответствующий обычной 3-х фазной обмотке, б – перемешиватель с тангенциальным намагничиванием магнитов, немагнитным корпусом и ферромагнитными полюсами, в – двухполюсный перемешиватель, соответствующий 3-х фазной обмотке с фазной зоной 120° и шагом $2/3 [0]$, г – двухполюсный перемешиватель с расщепленными полюсами, соответствующий 3-х фазной обмотке с фазной зоной 60° и шагом $1/3 [0]$.

На рис. 1 введены обозначения: 1 – жидкий металл ($\sigma = 7 \cdot 10^5 \text{ См/м}$, $\mu_r = 1$), 2 – гильза кристаллизатора ($\sigma = 5 \cdot 10^7 \text{ См/м}$, $\mu_r = 1$), 3 – область внутри кристаллизатора, заполненная водой ($\sigma = 0$, $\mu_r = 1$), 4 – корпус

кристаллизатора ($\sigma = 10^6 \text{ См/м}$, $\mu_r = 1$), 5 – воздушный зазор ($\sigma = 0$, $\mu_r = 1$), 6 – постоянный магнит ($\sigma = 0$, $\mu_r = 1,03$, $B_r = 1,2 \text{ Т}$), 7 – корпус перемешивателя ($\sigma = 10^6 \text{ См/м}$, $\mu_r = 400$), 8 – ферромагнитный полюс ($\sigma = 10^6 \text{ См/м}$, $\mu_r = 400$), α – угол раскрытия полюсов (характеризующий размер полюса).

Таблица 1 – Размеры перемешивателя

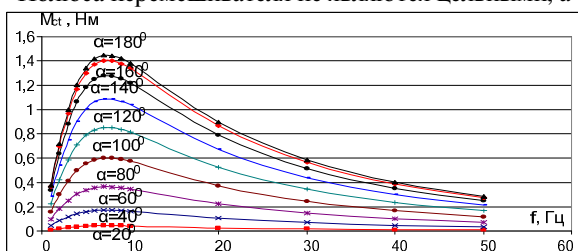
$\Gamma_1, \text{ М}$	$\Gamma_2, \text{ М}$	$\Gamma_3, \text{ М}$	$\Gamma_4, \text{ М}$	$\Gamma_5, \text{ М}$	$\Gamma_6, \text{ М}$	$\Gamma_7, \text{ М}$
0,05	0,062	0,215	0,225	0,238	0,263	0,285

Оптимальный вариант исполнения магнитной системы определяется по величине развиваемого электромагнитного момента, определяемого в предположении, что жидкий металл является твердым телом цилиндрической формы. Для упрощения вычислений принято, что скорость жидкого металла равна нулю.

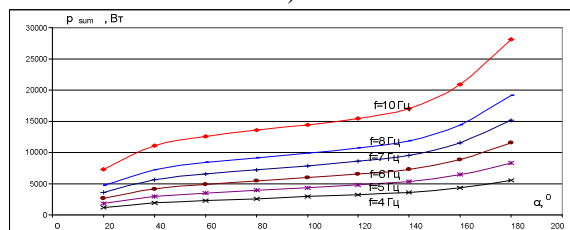
Расчеты проводились в движущейся системе координат с магнитами, т. е. магнитная система была неподвижна, а кристаллизатор с жидким металлом вращался. Угловая скорость вращения $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ задавалась в зависимости от частоты вращения постоянных магнитов, которая принимала в расчетах значения $f = 1 \div 50 \text{ Гц}$. Линейная скорость вращения элементов кристаллизатора по координатам (x, y) определялась как $v_x = -\omega \cdot y$, $v_y = \omega \cdot x$. Скорость вращения задавалась для областей 1, 2, 3, 4, показанных на рис. 1. Угол раскрытия полюсов α варьировалась в пределах от 0° до 180° , а для вариантов в и г (рис. 1) не превышала 120° и 60° соответственно.

Наиболее распространенным вариантом является двухполюсный перемешиватель в виде статора асинхронного двигателя обычного исполнения [0], у которого вместо обмотки статора используются дугвые постоянные магниты. Такой перемешиватель имеет простое исполнение. Недостаток такого исполнения заключается в том, что полюс имеет большой размер и его сложно изготовить, намагнитить и установить. Так как такую систему изготовить практически невозможно, предложено использовать магнитную систему с сегментированными полюсами. На рис. 1, а представлен его общий вид.

Полюса перемешивателя не являются цельными, а



а)

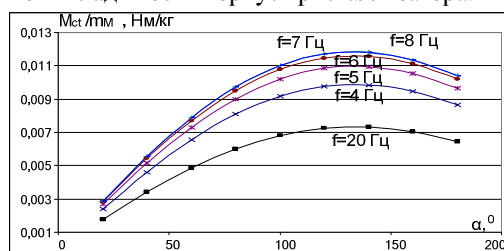


б)

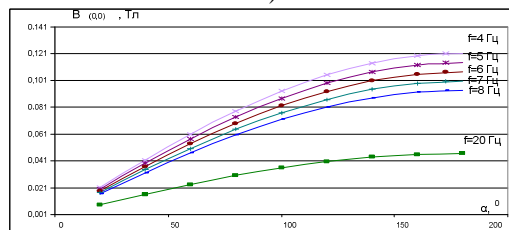
набираются из сегментов. Такой вариант является более простым с точки зрения изготовления и намагничивания магнитов, но в то же время усложняется конструкция крепления магнитов. Как видно из рис. 1, а, потоки рассеяния замыкаются между сегментами полюсов. А это, в свою очередь, приводит к уменьшению результирующего потока и силового воздействия на жидкий металл. Вторым негативным фактором является то, что при сближении магнитов создаются большие силы, стремящиеся раздвинуть магниты и создать зазор для замыкания потоков рассеяния. Это приводит к тому, что потребуется изготавливать достаточно сложное крепление магнитов, чтобы, с одной стороны, минимизировать зазор между магнитами, с другой – выдержать усилие отталкивания магнитов.

Для получения данных, которые будут соответствовать целевому полюсу, выполнено моделирование с установкой магнитов в полюсах с зазором и без них. Для сравнения было проведено моделирование сегментированного перемешивателя с магнитами, установленными в полюсах без зазоров. Магнит имеет вид трапеции с большим основанием 91,3 мм, малым основанием приблизительно 82,5 мм, толщиной 25 мм, углом наклона боковых граней 80° . Один сегмент занимает 20° угловых координат. Намагничены магниты по толщине, чтобы получить вид магнитного поля, приближенного к целевому магниту.

На рис. 2 представлены зависимости перемешивателя с сегментированными полюсами без зазора. Максимальные значения и частоты вращения, при которых они достигаются, а также формы кривых соответствуют заданным активным размерам и электрофизическим свойствам материалов перемешивателя и кристаллизатора. На рис. 2, а представлена зависимость электромагнитного момента жидкого металла от частоты вращения постоянных магнитов при разных углах раскрытия. Из этого графика можно сделать вывод, что максимальный электромагнитный момент в жидком металле для принятых активных размеров и электрофизических свойств материалов кристаллизатора и перемешивателя создается при частоте вращения от 7 до 8 Гц. Форма кривых обусловлена экранирующим действием материалов кристаллизатора, основной вклад вносит корпус кристаллизатора.



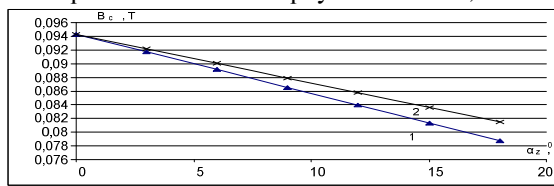
в)



г)

Рисунок 2 – Зависимости основных параметров перемешивателя с сегментированными полюсами без зазора

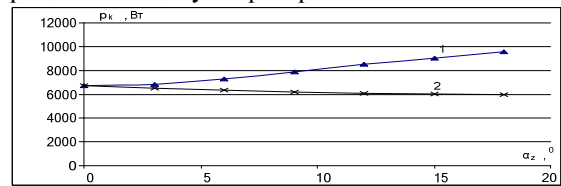
Зависимость электромагнитного момента в стали, отнесенного к массе магнитов от угла раскрытия полюсов (рис. 2, б), показывает, что наилучшее соотношение достигается при частоте от 7 до 8 Гц, а эффективное использование магнитов достигается при угле раскрытия полюсов от 120° до 160° . На рис. 2, в представлены зависимости потока электромагнитной мощности, передаваемой от вращающейся магнитной системы к жидкому металлу и другим конструктивным элементам (гильза, корпус и т.д.) от угла раскрытия. Из этого графика видно, что потери практически не изменяются при углах раскрытия от 60° до 140° , поэтому стоит выбирать угол раскрытия в этом диапазоне. Для рабочего режима при частоте вращения до 10 Гц наибольшие потери возникают в корпусе кристаллизатора (60 – 95 %), гильзе (5 – 40 %), наименьшие – в жидком металле (0,02 – 0,5 %). Например, при частоте вращения 7 Гц и угле раскрытия 140° потери составляют: в корпусе – 6708 Вт, в гильзе



а)

– 2779 Вт и в жидком металле – 28,4 Вт. На рис. 2, г представлены зависимости распределения индукции на оси симметрии кристаллизатора в зависимости от угла раскрытия и частоты вращения. Из них можно заключить, что угол раскрытия более 140° увеличивать нет необходимости.

Для определения влияния величины промежутка между магнитами в полюсе проведено моделирование для семисегментного полюса и двухсегментного полюса при постоянстве угла раскрытия. На рис. 3 представлены распределение индукции в жидком металле и потери в корпусе кристаллизатора в зависимости от величины полного (суммарного) немагнитного промежутка между сегментами в одном полюсе. При увеличении полного промежутка между сегментами полюса уменьшается угловой размер сегментов, но угол раскрытия полюса остается постоянным. Моделирование проводилось при частоте вращения 7 Гц и угле раскрытия 140° .



б)

Рисунок 3 – Распределение индукции в жидком металле и потери в корпусе кристаллизатора

Здесь 1 – один общий промежуток (полюс состоит из двух сегментов), 2 – семисегментный полюс (полюс состоит из семи сегментов), α_z – угловой размер суммарного промежутка (1° примерно равняется промежутку 4,4 мм для данного исполнения), P_k – электромагнитная мощность, рассеиваемая в корпусе кристаллизатора, B_c – индукция на оси симметрии кристаллизатора (в жидком металле).

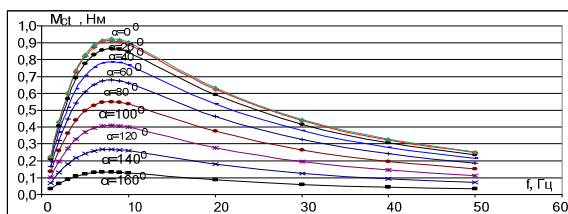
Из рис. 3, а видно, что при увеличении суммарного промежутка между сегментами индукция в жидком металле уменьшается, но для перемешивателей с меньшей степенью сегментирования уменьшается в большей степени. В то же время вариант 1 с меньшим сегментированием (рис. 3, б) вызывает большие потери в корпусе кристаллизатора по сравнению с вариантом 2. Поэтому для уменьшения потерь и увеличения индукции в жидком металле необходимо использовать магнитные системы с большей степенью сегментирования.

Вторым вариантом перемешивателя жидкого ме-

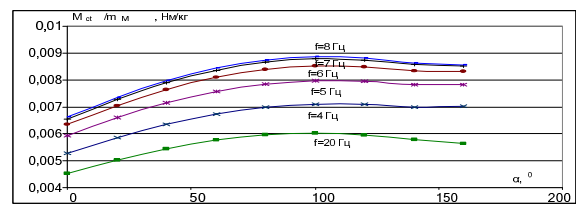
талла на постоянных магнитах является перемешиватель с тангенциальным намагничиванием и встречной установкой магнитов. На рис. 1, б представлен общий вид перемешивателя.

В таком варианте полюса намагничены не по радиусу, а по касательной и корпус перемешивателя выполнен уже не из ферромагнитной стали, а из нержавеющей стали, которая имеет магнитную проницаемость, равную проницаемости воздуха. А для того, чтобы магнитный поток прошел через центр жидкого металла, используются стальные ферромагнитные полюса 8 (рис.1, б). Для этого варианта исполнения угол раскрытия полюсов α – это угол раскрытия ферромагнитного стального полюса 8.

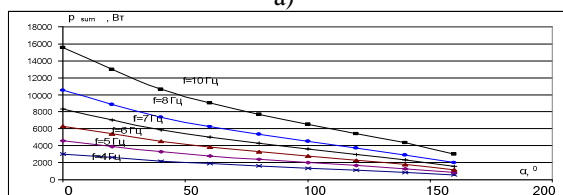
На рис. 4 представлены зависимости перемешивателя с тангенциальным намагничиванием магнитов. Из приведенных графиков видно, что при малых углах раскрытия полюса перемешиватель показывает лучшие результаты, чем при больших углах.



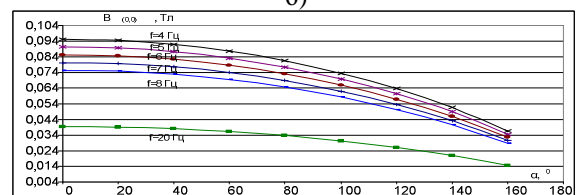
а)



б)



в)



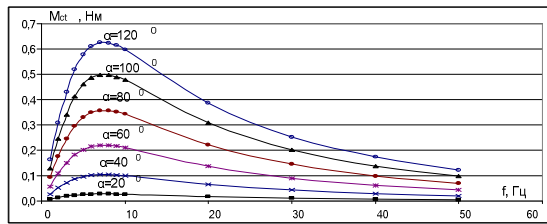
г)

Рисунок 4 – Зависимости перемешивателя с тангенциальным намагничиванием магнитов

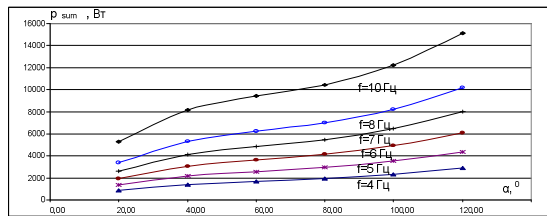
Как видно из рис. 4, а, формы кривых не изменились и максимум достигается при той же частоте. На рис. 4, б зависимость электромагнитного момента в стали, отнесенного к массе магнитов, от угла раскрытия полюсов показывает, что наилучшее соотношение достигается при угле раскрытия 100° и частоте от 7 до 8 Гц. Здесь потери энергии (рис. 4, в) уменьшаются пропорционально углу раскрытия для всех частот вращения. Как в предыдущем варианте, основные потери энергии выделяются в виде тепла в корпусе кристаллизатора. Индукция на оси кристаллизатора (в жидком металле) (рис. 4, г) уменьшается с увеличением угла раскрытия полюса, что обусловлено уменьшением массы магнитов. Например, при частоте 7 Гц и

угле раскрытия 100° индукция составляет 0,068 Тл.

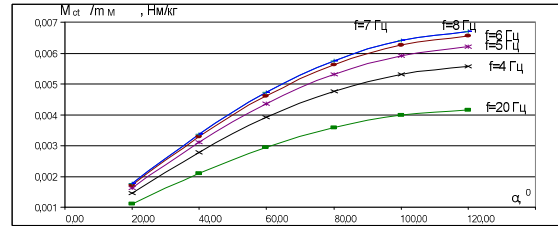
Третьим вариантом перемешивателя жидкого металла на постоянных магнитах является двухполюсный перемешиватель с тремя магнитами. На рис. 1, в представлен общий вид перемешивателя с постоянными магнитами, намагниченными по радиусу. Перемешиватель имеет два полюса с половинной толщиной и один с полной, которые размещены под углом 120° . Из рис. 1, в видно, что основной поток через расплавленный металл мал, из-за чего создается малое усилие перемешивания. Как видно из рис. 5, максимальный момент при предельном угле раскрытия 120° и частоте 7 Гц составляет всего 0,65 Нм, а для первого исполнения – 1,1 Нм.



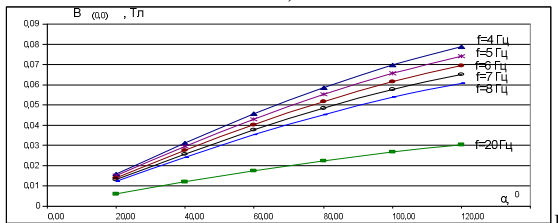
а)



б)



в)



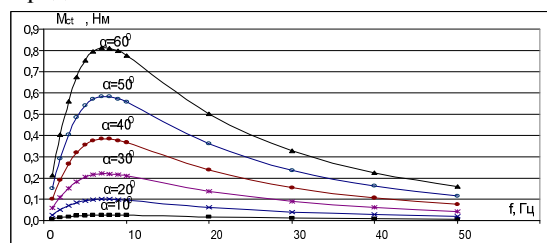
г)

Рисунок 5 – Зависимости основных параметров двухполюсного перемешивателя с тремя магнитами

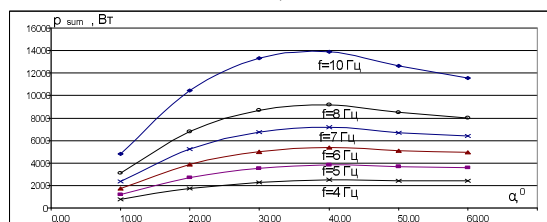
Из приведенных кривых видно, что максимальные показатели достигаются при предельном угле раскрытия 120° .

Четвертым рассмотренным вариантом перемешивателя жидкого металла на постоянных магнитах является перемешиватель, представленный на рис. 1, г. Такая система состоит из шести полюсов, два из которых имеют полную толщину, а четыре остальных – половину толщины основного магнита. Полюса радиально намагничены.

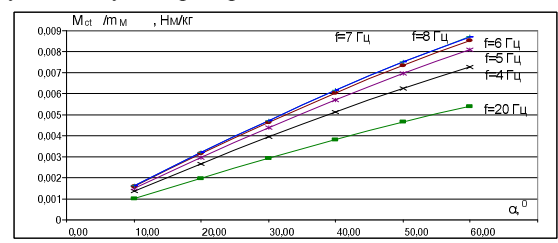
Кривые электромагнитных моментов жидкого металла от частоты вращения перемешивателя (рис. 6, а) имеют такую же форму, как и предыдущие варианты. Из рис. 6, в видно, что поток электромагнитной мощности, передаваемый от вращающейся магнитной системы к кристаллизатору, при превышении угла раскрытия больше 40° уменьшается. Максимальные значения индукции и величины момента, отнесенных к массе, достигаются при предельно допустимых углах раскрытия полюсов 60° .



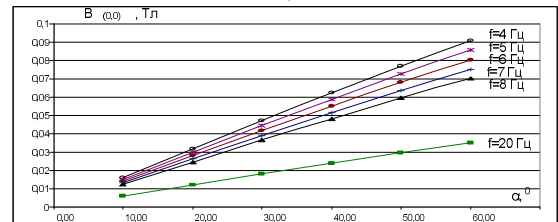
а)



б)



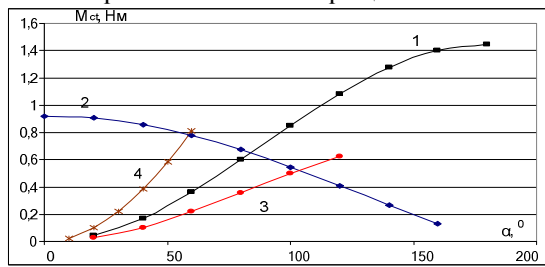
в)



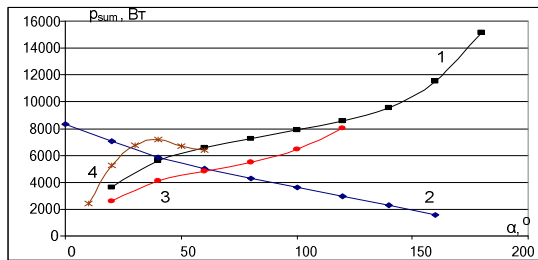
г)

Рисунок 6 – Зависимости основных параметров для перемешивателя на рис. 1, 2

Сравнительный анализ указанных двухполюсных магнитных систем разной конфигурации выполнен на рабочей частоте вращения магнитной

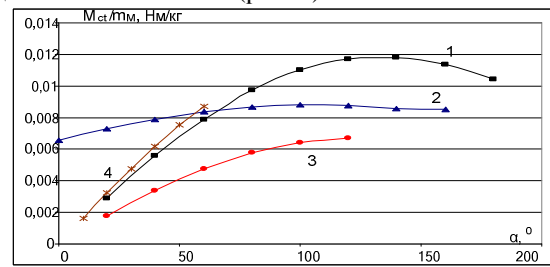


а)

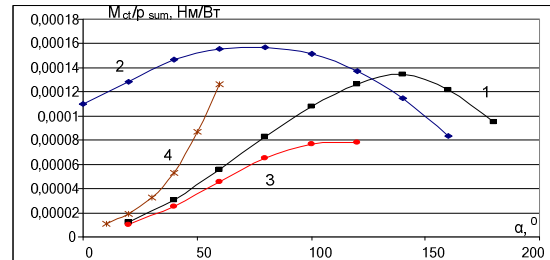


в)

системы 7 Гц (420 об/мин), при которой достигается максимальное значение электромагнитного момента для всех исполнений (рис. 7).



б)



г)

Рисунок 7 – Зависимости основных параметров для предложенных моделей магнитных систем перемешивателей

Здесь кривые 1, 2, 3, 4 соответствует исполнению магнитной системы согласно рис. 1 (1, а, 1, б, 1, в, 1, г).

На рис. 7, а представлено распределение электромагнитных моментов в жидком металле в зависимости от угла раскрытия полюсов для разных исполнений. Из графика видно, что максимальный электромагнитный момент создает перемешиватель с сегментированными полюсами (вариант 1, а). При небольших углах раскрытия перемешиватель с расщепленными полюсами (вариант 1, г) создает больший электромагнитный момент, чем сегментированный. Двухполюсный перемешиватель с тремя магнитами (вариант 1, в) имеет наименьший момент. Перемешиватель с тангенциальным намагничиванием магнитов (вариант 1, б) имеет большой электромагнитный момент при малых углах раскрытия.

На рис. 7, б представлена величина электромагнитных моментов, отнесенных к массе магнитов в зависимости от угла раскрытия для разных исполнений. Из графика видно, что для исполнения 1, а максимум момента достигается при угле 140° . Из этого следует, что превышать этот угол раскрытия представляется экономически нецелесообразным. Исполнение 1, б целесообразно использовать относительно остальных систем при углах раскрытия полюса от 0 до 60° . Исполнение 1, г следует использовать при углах раскрытия до 60° . Такая система оказывается более эффективной при малых углах раскрытия. Худшим по критерию удельного силового воздействия оказалось исполнение 1, в.

На рис. 7, в представлены зависимости потока электромагнитной мощности, передаваемой от вращающейся магнитной системы к жидкому металлу и другим конструктивным элементам кристаллизатора (гильза, корпус и т. д.), от угла раскрытия. Можно

отметить кривую 4, из которой видно, что такую систему лучше использовать при углах раскрытия от 40° до 60° . Кривая 1 имеет уплощение в диапазоне изменения угла раскрытия 60° – 140° . При увеличении угла раскрытия магнитов более 140° электромагнитная мощность резко возрастает, но электромагнитный момент (рис. 7, а) увеличивается незначительно. Это свидетельствует об увеличении тепловых потерь. Исполнение на рис. 1, в хотя и показало наименьшие значения суммарных потерь, имеет низкие показатели по электромагнитному моменту.

На рис. 7, г приведены кривые изменения относительного электромагнитного момента, приведенного к полной электромагнитной мощности в зависимости от угла раскрытия полюсов. Наилучшие удельные показатели имеет исполнение на рис. 1, б (кривая 2) при угле раскрытия полюсов 60° . Такое исполнение обладает хорошими показателями по эффективности использования постоянных магнитов и наивысшими показателями по удельному электромагнитному моменту, отнесенному к полной мощности.

Выводы. Разработаны критерии определения эффективности вращающихся магнитных систем ЭМП с постоянными магнитами. В основу определения эффективности положена величина электромагнитного момента, приведенного к массе магнитов или электромагнитной мощности. Наиболее эффективной структурой перемешивателя в соответствии с предложенными критериями является исполнение рис. 1, а с углом раскрытия 140° . Исполнение на рис. 1, б экономически целесообразно применять при небольших углах раскрытия. Исполнения, предложенные на рис. 1, в и рис. 1, г, существенных преимуществ не имеют.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арно П., Минь Ж.Ф., Бира Ж.П., Руэ Ж. Электромагнитное перемешивание по способу «Магнетогир» на МБЛЗ // Черные металлы. – 1980. – № 22. – С. 9–13.

2. Виштак Т.В., Карлов А.Н., Кондратенко И.П., Рашепкин А.П. Электромагнитное перемешивание жидкого металла в кристаллизаторе машин непрерывного литья заготовок с использованием постоянных магнитов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2009. – Вип. 3 (56), ч. 2. – С. 82–85.

3. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим Рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970. – 272 с.

4. Грачев В.Г., Шифрин И.Н., Сивак Б.А. и др. Электромагнитное перемешивание на сортовых,

блюмовых и слябовых МНЛЗ // Сталь. – 2002. – № 11. – С. 21–26.

5. Колесниченко А.А. Новые системы электромагнитного перемешивания для непрерывной разливки стали // Металлургическая и горная промышленность. – 2004. – № 8. – С. 161 – 168.

6. Маточкин В.А. Новые технические решения и этапы реконструкции МНЛЗ-3 на Белорусском металлургическом заводе // Сталь. – 2002. – № 10. – С. 26–28.

Стаття надійшла 24.06.2011р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕМІШУВАЧІВ РІДКОГО МЕТАЛУ В КРИСТАЛІЗАТОРІ МАШИН БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК

*О. М. Карлов, інж., І. П. Кондратенко, д.т.н., проф., А. П. Ращепкін, д.т.н., проф.
Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ
просп. Перемоги, 56, 03680, м. Київ, Україна
E-mail: dep7ied@ukr.net*

Проведено аналіз енергетичних показників двополюсних магнітоелектричних перемішувачів рідкого металу в кристалізаторі машин безперервного лиття заготовок з різним виконанням магнітних систем. У роботі досліджено чотири варіанта магнітних систем. Для визначення ефективності магнітних систем у якості критеріїв використовуються: електромагнітний момент рідкого металу, індукція в центрі кристалізатора, електромагнітна потужність.

Ключові слова: перемішувач рідкого металу, кристалізатор, постійні магніти.

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF PERMANENT-MAGNET STIRRER OF LIQUID METAL IN THE CASTING MOLD CC MACHINE

*О. Karlov, ing., I. Kondratenko, D.Sc. (Eng.), Prof., A. Raschepkin, D.Sc. (Eng.), Prof.
Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine
prosp. Peremohy, 56, 03680, Kyiv, Ukraine
E-mail: dep7ied@ukr.net*

It has been carried out the analysis of energy parameters of two-pole magnetoelectric stirrer of liquid metal in continuous casting mold with different modification of magnetic systems. Four variants of magnetic systems have been research in paper. For definition of efficiency of magnetic systems as measure have been used: the electromagnetic moment of liquid metal; an induction at the continuous casting mold centre; electromagnetic power.

Key words: stirrer of liquid metal, continuous casting mold, permanent magnets.