

естественным образом. Дальнейшая разработка такого комплексного способа обработки расплава, продиктованная требованиями высокотехнологичных производств к силуминам, должна обеспечить не только повышение эффекта модифицирования, но и экономию дорогостоящих модифицирующих добавок.



Список литературы

1. Конкевич В. Ю., Овчинников Ю. В., Шадаев Д. А. Лигатуры для легирования и модифицирования алюминиевых сплавов – состояние рынка, проблемы и перспективы производства // Технология легких сплавов. – 2006. – № 1-2. – С. 137-142.
2. Murty B. S., Kori S. A., Chakraborty M. Grain Refinement of Aluminium and its Alloys by Heterogeneous Nucleation and Alloying // International Materials Reviews. – 2002. – Vol. 47, № 1. – P. 3-29.
3. Quested T. E. Understanding Mechanisms of Grain Refinement of Aluminium Alloys by Inoculation // Materials Science and Technology. – 2004. – Vol. 20, № 11. – P. 1357-1369.
4. Kumar Vinod G. S., Murty B. S., Chakraborty M. Settling Behaviour of TiAl₃, TiB₂, TiC and AlB₂ Particles in Liquid Al During Grain Refinement // International Journal of Cast Metals Research. – 2010. – Vol. 23, № 11. – P. 193-204.
5. Исследование кавитационных возмущений в жидком металле, подвергнутом электрогидроимпульсной обработке /В. Н. Цуркин, А. В. Синчук, Я. В. Крептюк, Ю. Н. Дегтев // Процессы литья. – 2007. – № 4. – С. 9-15.

Поступила 21.06.2011

УДК 669.715:538.244

Л. П. Пужайло, А. В. Серый, С. Л. Поливода

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ РАЗЛИЧНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МГД-УСТАНОВКАХ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И РАЗЛИВКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Исследовано распределение магнитного поля в воздушном зазоре электромагнитов различной конфигурации. Определены направление силовых линий и индукция магнитного поля в воздушном зазоре электромагнитов, а также область существования магнитного поля. Проведен сравнительный анализ исследованных магнитных полей и определены области рациональных мест расположения рабочей зоны в МГД-установках с различными типами электромагнитов. Установлено, что при расположении рабочей зоны под углом 40-50° в случае применения электромагнита с полюсами, расположенными под углом 90° друг к другу, толщина футеровки в верхней части рабочей зоны увеличивается в 2-3 раза, что обеспечивает высокую эксплуатационную надежность канала. На основании проведенных исследований выбран тип электромагнита вакуумной МГД-установки для приготовления и разливки алюминиевых сплавов, который обеспечивает увеличение срока службы канала в 4-5 раз.

Ключевые слова: электромагниты, МГД-установка, магнитное поле, алюминиевые сплавы.

Получение и обработка расплавов

Досліджено розподіл магнітного поля у повітряному зазорі електромагнітів різних конфігурацій. Визначено напрямки силових ліній та індукцію магнітного поля у повітряному зазорі електромагнітів, а також область існування магнітного поля. Проведено порівняльний аналіз досліджених магнітних полів та визначено області раціональних місць розташування робочої зони МГД-установки для різних типів електромагнітів. Встановлено, що при розташуванні робочої зони під кутом $40-50^\circ$ у випадку застосування електромагніту з полюсами, розташованими під кутом 90° , товщина футерівки у верхній частині робочої зони збільшується у 2-3 рази, що забезпечує високу експлуатаційну надійність каналу. На основі проведених досліджень зроблено вибір типу електромагніту вакуумної МГД-установки для приготування та розливання алюмінієвих сплавів, який забезпечує збільшення строку служби каналу у 4-5 разів.

Ключові слова: електромагніти, МГД-установка, магнітне поле, алюмінієві сплави.

Magnetic field distribution in air gap of magnets of different configurations was researched. Force lines direction and magnetic field induction in air gap of electromagnets, as well as the domain of existence of magnetic field were defined. Comparative analysis of researched magnetic fields was carried out and the areas of rational places of working zones arrangement in MHD-installations with different types of electromagnets were defined. It was established that in the case of working zone arrangement at an angle of $40-50^\circ$ applying the electromagnets with poles, fettling thickness in the top working zone increases in 2-3 times, that provides for high channel maintainability. On the basis of executed researches the choice of electromagnet type of vacuum MHD-unit for aluminum alloys preparation and cast was chosen, which provides for channel lifetime increase in 4-5 times.

Keywords: electromagnets, MHD-unit, magnetic field, aluminum alloys.

Вакуумные магнитодинамические установки (МГД-установки) находят применение для приготовления высокопрочных алюминиевых деформируемых сплавов и полунепрерывного литья из них слитков [3]. Принцип действия МГД-установки (рис. 1) основан на использовании электромагнитных сил, возникающих при взаимодействии электрического тока, индуцированного в жидком металле, с внешним магнитным полем. В МГД-установке заложен трансформаторный принцип преобразования электрической энергии в тепловую, где первичной обмоткой является обмотка индуктора, а вторичной – виток жидкого металла. Подводимое к обмотке 1 индуктора напряжение переменного тока создает в магнитопроводе 2 индуктора переменный магнитный

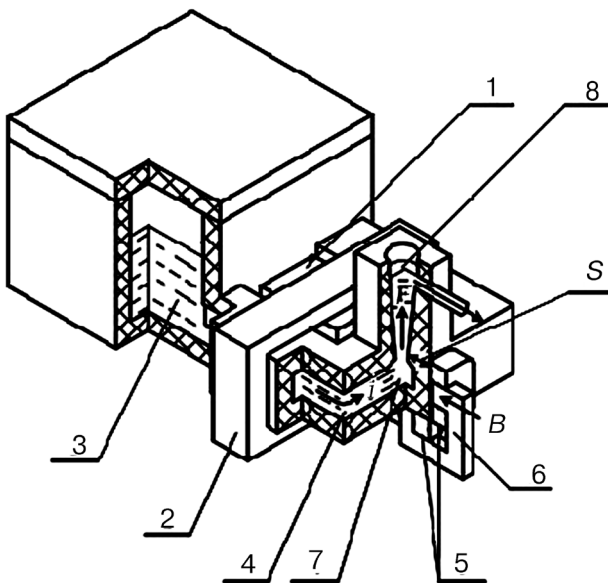


Рис. 1. Принципы действия МГД-установки

потока, который обуславливает индуктирование тока I в жидком металле 3 кольцевого горизонтального канала 4.

При этом металл нагревается. Направление электромагнитной силы, под действием которой движется металл, определяется правилом Ленца. При подаче напряжения переменного тока на обмотки 5 электромагнита 6 в рабочей зоне 7 создается магнитное поле B , по направлению перпендикулярное току I . Рабочая зона представляет собой участок канала, расположенный в магнитном поле электромагнита. При взаимодействии тока I в жидком металле с внешним

магнитным полем B возникает электромагнитная сила F , под действием которой осуществляется движение жидкого металла по сливному металлопроводу δ и далее в литейную форму.

Известно [4], что такие явления, как гидродинамические пульсации, вихревое движение металла, влияющие на рабочие параметры МГД-установок, происходят в их рабочей зоне. Эти факторы оказывают значительное влияние на растворение легирующих и модифицирующих элементов и рафинирование в вакууме алюминиевых сплавов. Интенсивность их воздействия на жидкий металл определяется конструкцией электромагнита и канала. При этом канал, как наиболее ответственный узел, имеет недостаток – малый срок службы, что снижает эксплуатационную надежность установки в целом. Надежность канала в значительной мере зависит от термостойкости футеровки, а также ее толщины S в верхней части рабочей зоны, где создается максимальное электромагнитное давление. Толщина футеровки в рабочей зоне, прежде всего, зависит от конструкции электромагнита. Как правило, конструкции магнитопроводов электромагнитов разрабатывались применительно к конструктивным и технологическим особенностям МГД-установок [2]. Для создания магнитного поля в рабочей зоне МГД-установки в основном применяются двух- и однополюсные электромагниты, причем двухполюсные можно разделить на два вида: с полюсами, расположенными под углом 90° друг к другу, и полюсами, расположенными соосно друг против друга.

В настоящее время достаточно подробно изучены однополюсные [1] и двухполюсные [2] электромагниты с полюсами, расположенными соосно друг против друга, однако до настоящего времени не было проведено сравнительного анализа электромагнитных характеристик электромагнитов различных конфигураций в равных условиях.

Цель работы – экспериментальное исследование распределения магнитного поля в воздушном зазоре электромагнитов различных конфигураций, проведение сравнительного анализа магнитных полей, создаваемых электромагнитами, определение интегральной магнитной индукции в рабочей зоне для выбора типа электромагнита и определения оптимального места расположения рабочей зоны МГД-установки. Интегральной магнитной индукцией магнитного поля в рабочей зоне условно назвали суммарное значение индукции, создаваемой магнитным полем электромагнита в объеме рабочей зоны.

Для проведения исследований были разработаны и изготовлены магнитопроводы 1 сечением 130 см^2 и обмотки 2 (рис. 2), позволяющие собирать и исследовать различные типы электромагнитов, используя одни и те же конструктивные элементы: тип А (рис. 2, а) – однополюсный электромагнит, тип Б (рис. 2, б) – двухполюсный электромагнит с полюсами, расположенными соосно друг против друга, тип В (рис. 2, в) – двухполюсный электромагнит с полюсами, расположенными под углом 90° друг к другу. Элементы магнитопровода соединялись между собой сварными соединениями. Для исследования электромагнитов был разработан и изготовлен стенд, схема которого приведена на рис. 2, г. Он включает в себя экспериментальный электромагнит 1, планшет 2 с координатной сеткой, штатив 3, измерительную катушку 4 и держатель катушки 5.

Исследование распределения магнитного поля в воздушном зазоре электромагнитов во всех случаях проводилось в режиме холостого хода при равной потребляемой активной мощности $W = 660 \text{ Вт}$ как средней величины области оптимальных режимов работы электромагнитов различных конфигураций. При исследовании интегральной магнитной индукции в рабочей зоне измерительная катушка (50 витков медного эмаль-провода), изготовленная по размерам рабочей зоны ($60 \times 85 \times 20 \text{ мм}$), располагалась в магнитном поле электромагнитов на расстоянии 50 мм от торцов полюсов. Как показывает практический опыт, такая толщина футеровки канала является наиболее рациональной с точки зрения конструкции канала и его срока службы. В связи с этим у электромагнита типа Б воздушный

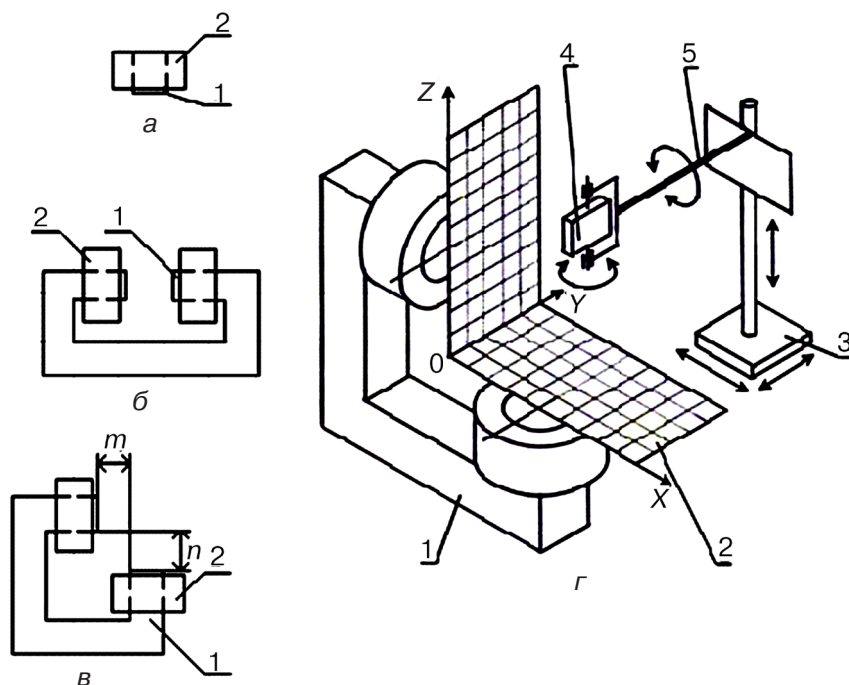


Рис. 2. Различные типы электромагнитов

зазор между полюсами был равен 120 мм, а расстояния m и n между полюсами электромагнита типа В равнялось 55 мм. Для электромагнитов типа А и Б центр координат был выбран в точке пересечения осей на торцевой плоскости полюса, для электромагнита типа В – в точке пересечения торцевых плоскостей полюсов. Магнитное поле в воздушном зазоре электромагнита измерялось катушкой, имеющей форму прямоугольной призмы с размерами 26x20x8 мм, на которую было намотано 150 витков медного эмаль-провода. Катушка имела возможность вращаться вокруг своих взаимно перпендикулярных осей. Отсчет угловых отклонений катушки в плоскостях $Z-X$ и $Z-Y$ производился по шкалам, зафиксированным на держателе катушки, который крепился к штативу и имел возможность перемещаться вдоль оси $\theta-Z$, отслеживая тем самым координату Z . На рабочем столе были установлены две взаимно перпендикулярные направляющие, при перемещении вдоль которых отслеживались координаты X и Y . Измерительная катушка с такими размерами и конструктивным исполнением позволяла измерять не только величину э. д. с., наводимой магнитным полем в любой координате воздушного зазора электромагнита, но и геометрически отслеживать направление силовых линий магнитного поля путем изменения углов установки катушки в пространстве до получения максимального значения э. д. с., наводимой в ней магнитным полем. При этом нормаль к плоскости катушки определяла направление вектора силовых линий магнитного поля.

Магнитная индукция в любой точке воздушного зазора определялась по формуле

$$B = \frac{E}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot S_K \cdot W_K}, \text{ Тл}, \quad (1)$$

где E – э. д. с., B , индуцированная в катушке в какой-либо точке воздушного зазора; f – частота сети, Гц; S_K – площадь катушки, м²; W_K – количество витков катушки.

Общее магнитное поле, создаваемое электромагнитом, можно разделить на три составляющих: рабочее поле, проходящее через рабочую зону и замыкающееся

через полюса; магнитное поле в магнитопроводе; поля рассеяния обмотки электромагнита. Основное внимание было уделено изучению рабочего магнитного поля и полей рассеяния обмоток.

Выбор оптимального места расположения рабочей зоны осуществлялся по трем критериям – направлению силовых линий и величине индукции магнитного поля в воздушном зазоре, а также по значению интегральной индукции магнитного поля в рабочей зоне. Объемная электромагнитная сила в жидком металле определяется по формуле

$$F_{\text{Э}} = j \cdot B \cdot \cos\varphi, \quad (2)$$

где j – плотность тока I в рабочей зоне; B – индукция магнитного поля в рабочей зоне; φ – угол между вектором магнитного поля и током в жидком металле.

Исходя из формулы (2), оптимальной областью расположения рабочей зоны является такая область, у которой силовые линии магнитного поля параллельны и направлены перпендикулярно току в жидком металле.

В электромагните типа А все силовые линии замыкаются вокруг обмотки. Поле рассеяния по оси Z (рис. 3, а) простирается на значительное расстояние ($Z = 190$ мм). Вокруг обмотки поля рассеяния описывают окружность радиусом 240 мм, причем отличие конфигурации полей рассеяния в плоскостях Z - X и Z - Y составляет не более 3-4 %, что объясняется конструктивным исполнением магнитопровода электромагнита. Силовые линии, исходящие с магнитопровода в координатах $\pm X = 40$, $\pm Y = 40$ до координаты $Z = 60$, можно считать направленными перпендикулярно к оси торцевой плоскости. От $Z = 50$ до $Z = 75$ пространственная ориентация силовых линий изменяется. Часть магнитного поля, условно ограниченного координатами $\pm X = 40$ мм, $\pm Y = 40$ мм, $Z = 75$ мм, можно считать областью оптимального расположения рабочей зоны для электромагнита типа А.

Электромагнит типа Б имеет более сложную конфигурацию силовых линий в воздушном зазоре (рис. 3, б). Как видно, для этого типа электромагнита оптимальным местом расположения рабочей зоны является середина воздушного зазора $X = 60$ мм.

Силовые линии магнитного поля, замыкающиеся между полюсами по координатам $\pm Z = 40$ мм, $\pm Y = 40$ мм, практически прямолинейные, что свидетельствует об однородности рабочего магнитного поля в центральной части зазора. По мере удаления магнитопровода от центра происходит изменение пространственной ориентации силовых линий по середине воздушного зазора, оно достигает максимального значения у края обмотки $\pm Y(Z) = 90$ мм. Далее в воздушном зазоре электромагнита распространяются поля рассеяния, которые достигают $\pm Z = 200$ мм, $\pm Y = 200$ мм.

При проведении исследований особое внимание было уделено электромагниту типа В, так как электромагнит такой конфигурации исследован недостаточно. Силовые линии магнитного поля в плоскости Z - X (при $Y = 0$) (рис. 3, в) в координатах $X = 50$, $Z = 50$ замыкаются между полюсами по окружности, которая с удалением от центра координат переходит в более сложную кривую. При $X = 150$, $Z = 150$ взаимодействие магнитных полей, создаваемых двумя обмотками электромагнита, прекращается и начинаются поля рассеяния. Направление силовых линий магнитного поля определяет наиболее благоприятное расположение рабочей зоны для данного типа магнитопровода – под углом 45° к торцевым плоскостям полюсов.

При конструировании МГД-установок необходимо учитывать область распространения магнитного поля для правильного выбора материала, так как металлоконструкции, размещенные в магнитном поле, могут подвергаться нагреву за счет наводимых в них токов Фуко. Определение области распространения магнитного поля позволяет также выбрать зону расположения контрольно-измерительных приборов, исключив влияние на них магнитного поля.

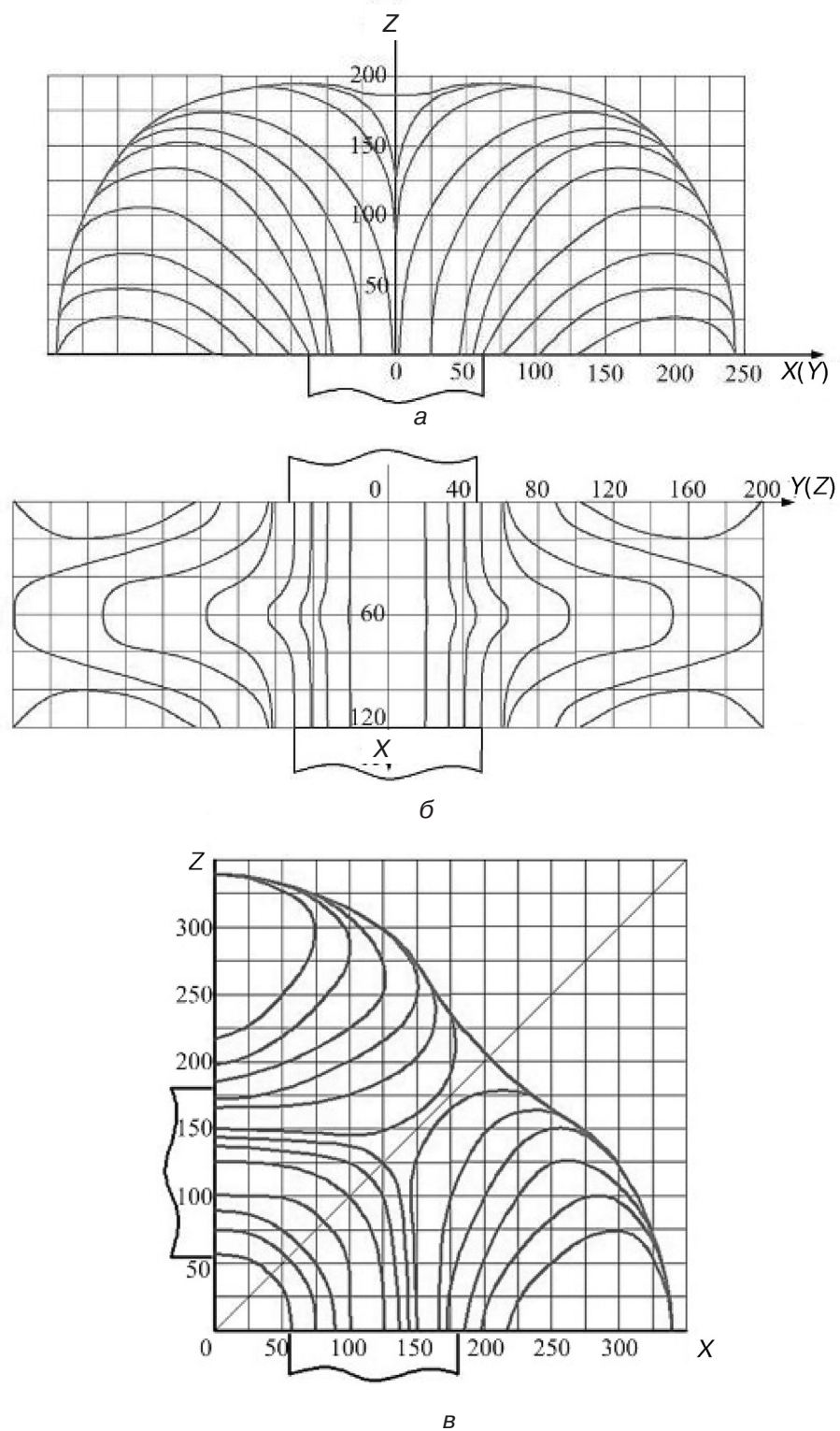


Рис. 3. Силовые линии электромагнита

Получение и обработка расплавов

Область существования магнитного поля (область, ограниченная поверхностью нулевой напряженности) в воздушном зазоре электромагнита типа А представлена на рис. 4, а и в приближении ее можно представить как шаровой сегмент. В центре сегмента по оси Z наблюдается незначительное ослабление магнитной индукции. Характер спада поверхности нулевой напряженности к координатам $\pm X = 240$ мм, $\pm Y = 240$ мм плавный и симметричный.

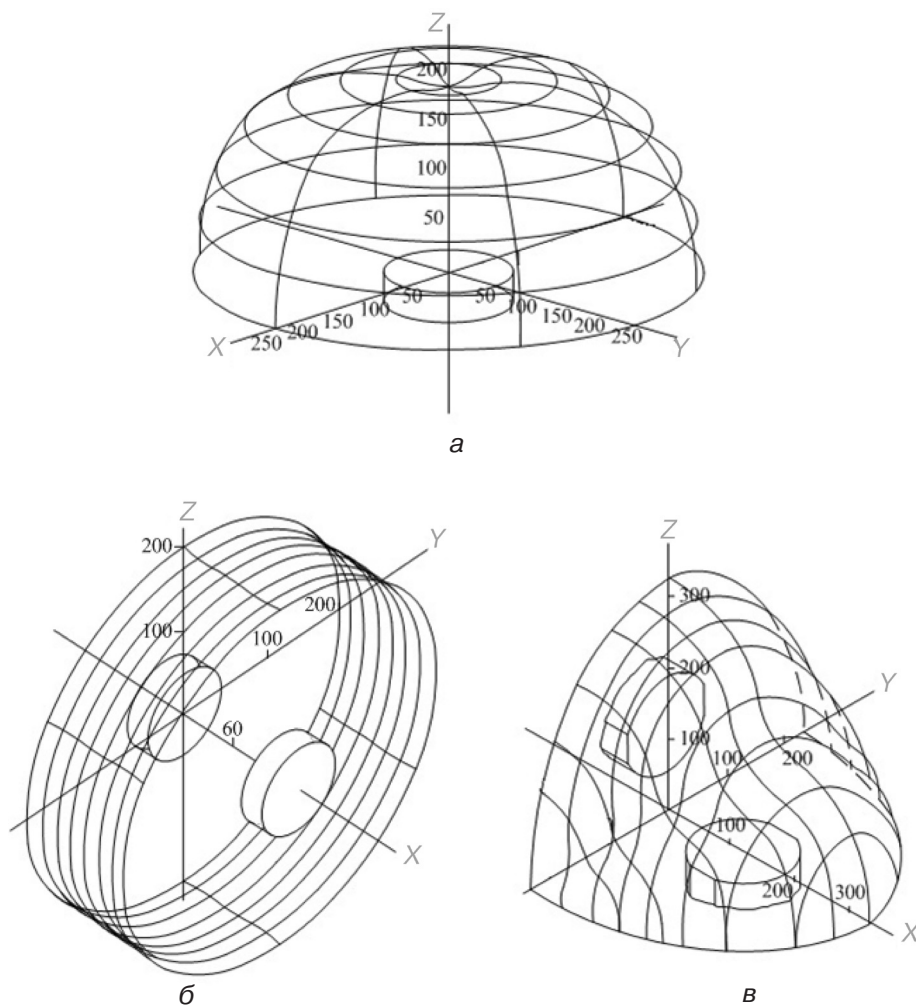


Рис. 4. Области существования магнитного поля электромагнита типов А, Б, В

Область существования магнитного поля электромагнита типа Б (рис. 4, б) симметрична относительно оси X и описывает вокруг нее практически цилиндрическую поверхность с радиусом окружности основания $R = 200$ мм.

Большой воздушный зазор электромагнита типа В приводит к сложному объемному распределению области существования магнитного поля в воздушном зазоре (рис. 4, в). Она простирается на достаточно большие расстояния от центра координат, в мм: $X = 340$; $\pm Y = 240$; $Z = 340$. По осям X и Z удаление магнитного поля несколько больше, чем по оси Y . В этой конструкции электромагнита в плоскости Z - X по биссектрисе угла наблюдается явно выраженное снижение индукции магнитного поля, которое по мере приближения к оси Y сглаживается. Характер спада магнитного поля относительно плоскости Z - X к координате $\pm Y = 240$ мм плавный и симметричный.

Исследование индукции магнитного поля электромагнитов дало следующие результаты.

Индукция магнитного поля электромагнита типа А имеет максимальное значения $B = 0,1$ Тл у торца магнитопровода (рис. 5, а). В дальнейшем линии равной напряженности магнитного поля в воздушном зазоре расположены концентрично относительно центра координат. По координате $Z = 110$ мм зафиксировано незначительное снижение индукции, которое по мере удаления от магнитопровода проявляется еще больше. Относительно большие значения индукции ($0,045$ Тл) наблюдаются до координат $\pm X = 105$ мм, $\pm Y = 105$ мм, $Z = 80$ мм. Таким образом, область, ограниченная этими координатами, определяет оптимальное место расположения рабочей зоны для данного типа электромагнита.

У электромагнита типа Б максимальная индукция также находится у полюсов $B = 0,1$ Тл (рис. 5, б). По мере приближения к середине воздушного зазора она уменьшается до $0,085$ Тл. Как видно, с точки зрения создания максимальной индукции в области расположения рабочей зоны (по середине воздушного зазора) такая конструкция электромагнита является более предпочтительной по сравнению с предыдущим вариантом.

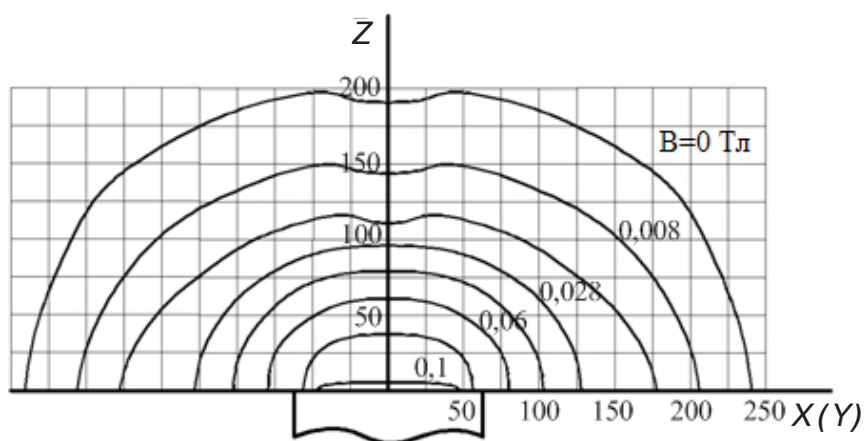
Линии равной напряженности электромагнита типа В в плоскости $X-Z$ при $Y = 0$ (рис. 5, в) расположены симметрично относительно биссектрисы угла. Вблизи полюсов наблюдается значительное искривление линии ($B = 0,1$ Тл), которое по мере удаления от полюсов выпрямляется. Относительно большие значения индукции магнитного поля ($B = 0,053$ Тл) наблюдаются до координат $X = 220$ мм, $Z = 220$ мм, что соответствует наружному диаметру обмотки электромагнита. Далее следует снижение напряженности до нуля. Линии равной напряженности перпендикулярны биссектрисе угла. Данный факт указывает на то, что расположение рабочей зоны под углом 45° к торцам полюсов является оптимальным для данного типа электромагнита. Область максимальной индукции, создаваемой в воздушном зазоре, можно очертить окружностью радиусом 180 мм, то есть по крайним точкам полюсов. Это достаточно хорошо согласуется с пространственной ориентацией силовых линий магнитного поля (см. рис. 3, в).

При исследовании интегральной магнитной индукции магнитного поля в воздушном зазоре электромагнитов измерительная катушка в воздушном зазоре устанавливалась следующим образом:

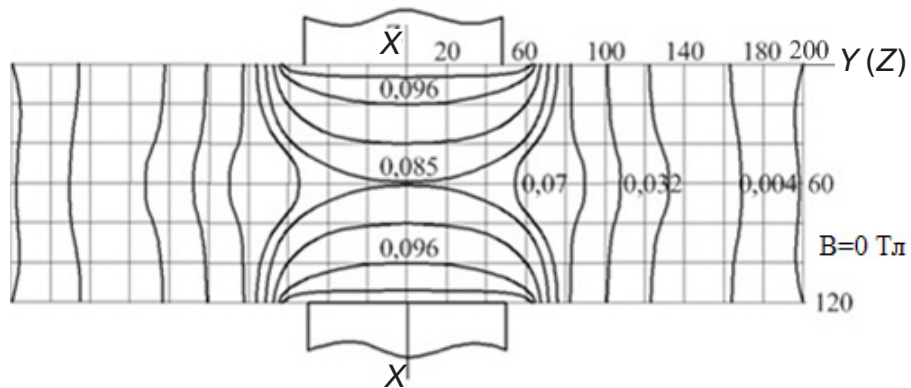
- электромагнит типа А – параллельно и симметрично по центру торцевой плоскости магнитопровода;
- электромагнит типа Б – по середине воздушного зазора параллельно и симметрично по центру торцевых плоскостей полюсов;
- электромагнит типа В – параллельно одной из торцевых плоскостей полюсов; под углом 45° к торцевым плоскостям полюсов.

Данные, полученные в результате проведения экспериментов, приведены в таблице. Как видно, с точки зрения создания магнитной индукции в рабочей зоне предпочтительным является электромагнит типа Б, значительно (36%) ему уступает однополюсный электромагнит. У электромагнита типа В при параллельном расположении рабочей зоны интегральная индукция магнитного поля меньше на 29% . В случае расположения рабочей зоны под углом 45° – меньше на 27% .

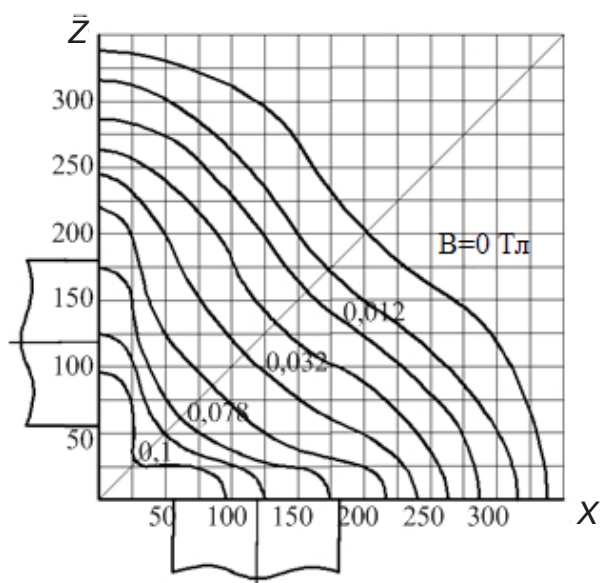
Анализ данных, полученных в результате экспериментальных исследований распределения магнитного поля в воздушном зазоре электромагнитов различной конфигурации при прочих равных условиях, показывает, что пространственная ориентация силовых линий и линий равной напряженности магнитного поля, проходящих через рабочую зону, а также в полях рассеяния зависит от конфигурации магнитопровода. Исходя из конфигурации магнитного поля, можно предварительно определить оптимальное место расположения рабочей зоны. Проведенными исследованиями установлено, что, несмотря на снижение интегральной магнитной индукции в рабочей зоне на 27% при расположении рабочей зоны под углом $40-50^\circ$



а




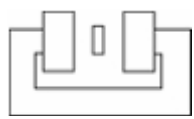


б



в

Рис. 5. Индукция магнитного поля электромагнитов

Данные, полученные в результате экспериментальных исследований

Конфигурация электромагнита и расположение рабочей зоны				
Интегральная магнитная индукция в рабочей зоне, Тл	0,045	0,07	0,05	0,051
Процентное отношение к максимальной индукции	64	100	71	73

[5], электромагниты типа В являются более предпочтительными перед электромагнитами типа Б. Это связано с увеличением толщины футеровки S (см. рис.1) в верхней части рабочей зоны, где электромагнитное давление достигает максимальных значений и создаются условия повышенного износа футеровки канала. Как показывает опыт эксплуатации МГД-установок с электромагнитами типа Б и В, протекание металла в канале установки в 90 % случаев происходит в верхней части рабочей зоны с электромагнитом типа Б.

В случае применения электромагнита типа В в МГД-установке и расположения рабочей зоны под углом 40-50° к торцевым плоскостям полюсов толщина футеровки в верхней части рабочей зоны увеличивается в 2-3 раза по сравнению с параллельным расположением рабочей зоны относительно полюсов, что обеспечивает высокую эксплуатационную надежность канала. Эксплуатация установок с различными конфигурациями электромагнитов показала, что установки с электромагнитом типа В имеют срок службы каналов в 4-5 раз выше по сравнению с установками, снабженными электромагнитом типа А и Б.



Список литературы

1. Горшков А. О., Новиков И. М. Экспериментальное исследование однополюсного электромагнита магнитодинамического насоса // XII МГД. – Рига, 1987. – С. 135-138.
2. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / В. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн и др. / Под ред. В. А. Ефимова. – Киев: Наук. думка, 1989. – 256 с.
3. Пужайло Л. П., Дубоделов В. И. Магнитодинамические установки для рафинирования алюминиевых сплавов // Технология обработки легких и специальных сплавов. – М.: Металлургия, 1994. – С. 422-434.
4. Пужайло Л. П., Прохоренко Л. Н., Ермачков О. А. О «зарастании» каналов индукционных канальных печей и магнитодинамических установок // Магнитодинамические установки для плавки, обработки и заливки литейных сплавов. – Киев: Ин-т пробл. литья АН УССР, 1989. – С. 70-78.
5. Заявка на изобретение «Установка для приготовления и электромагнитной заливки сплавов в литейные формы» № а 2009-07285 от 10.07.2009 г.

Поступила 07.07.2011.