

УДК 621.746.2:66.028

**В. И. Дубоделов, Ю. В. Моисеев, Н. А. Слажнев,
К. С. Богдан, Н. А. Кудрявченко, В. К. Погорский,
А. О. Горшков**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ВЛИЯНИЕ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Определены факторы, снижающие эффективность работы литейных магнитодинамических установок (МДУ) для алюминиевых сплавов. Показано, что основной резерв повышения эксплуатационных характеристик МДУ связан с уменьшением рассеивания и повышением концентрации магнитных полей в тройниковой рабочей зоне (р. з.) МДУ, а также со снижением негативного влияния вихревых структур на ее границах. Описана методика «пространственного (3D) измерения» параметров распределения магнитных полей с помощью разработанного 3-векторного датчика индукции. Даны результаты экспериментальных исследований, позволившие оценить влияние МГД-эффектов в тройниковой р. з. на эффективность работы и эксплуатационные характеристики МДУ. Намечены пути оптимизации систем создания электромагнитных полей в р. з. с целью повышения гидротермического КПД и стабилизации эксплуатационных характеристик МДУ.

Ключевые слова: литейная магнитодинамическая установка, магнитные поля рассеивания, тройниковая рабочая зона, 3-векторный датчик индукции, эксплуатационные характеристики.

Визначено чинники, що знижують ефективність роботи ливарних магнітодинамічних установок (МДУ) для алюмінієвих сплавів. Показано, що основний резерв підвищення експлуатаційних характеристик МДУ пов'язаний із зменшенням розсіювання і підвищенням концентрації магнітних полів в трійниковій робочій зоні МДУ, а також із зниженням негативного впливу вихрових структур на її границях. Описана методика «просторового (3D) вимірювання» параметрів розподілу магнітних полів за допомогою розробленого 3-векторного датчика індукції. Наведено результати експериментальних досліджень, що дозволили оцінити вплив МГД-ефектів в трійниковій робочій зоні на ефективність роботи та експлуатаційні характеристики МДУ. Намічено шляхи вдосконалення систем створення електромагнітних полів в робочій зоні з метою збільшення гідротермічного ККД, підвищення і стабілізації технічних та експлуатаційних характеристик МДУ.

Ключові слова: ливарна магнітодинамічна установка, магнітні поля розсіювання, трійникова робоча зона, 3-векторний датчик індукції, експлуатаційні характеристики.

The factors of lowering efficiency of work of casting magnetodynamic installations (MDI) for aluminium alloys are definite. It is shown, that basic reserve of rise of the operating characteris-

tics MDI is related to reduction of dispersion and rise of concentration of the magnetic fields in the three-way working area MDI, and also with rising of negative influencing of vortical structures on its frame. The method of the «three-axis (3D) measuring» of magnetic fields distributing parameters is resulted by the means of the developed three-vector sensor of induction. The results of experimental researches, allowing estimate influencing of MHD-effects in a three-way working area on efficiency of work and operating characteristics MDI, are given. The ways of perfection of the electromagnetic fields creation systems in a working area are set, with the purpose of rise of hydrothermal efficiency coefficient and stabilization of the operating characteristics of MDI.

Keywords: casting magnetodynamic installation, dispersion of magnetic fields, three-way working area, three-vector sensor of induction, operating characteristics.

Введение

В Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины было разработано оригинальное литейное МГД оборудование – магнитодинамические установки (МДУ), не имеющие аналогов в Украине и за рубежом [1].

Основное его функциональное назначение – внепечная обработка и электромагнитная разливка жидких металлов, в частности, алюминиевых сплавов. Такие установки серийно выпускались и были широко внедрены на предприятиях бывшего СССР и за рубежом, они пользуются спросом и в настоящее время [2]. Это объясняется простотой конструкции: тигель, Ш-образный канал, два индуктора, создающих по принципу трансформатора индукционный ток в жидком металле в канале МДУ, и электромагнит, генерирующий переменное магнитное поле на одном из участков канала по нормали к току в металле. При взаимодействии тока и внешнего магнитного поля возникает электромагнитная сила, приводящая жидкий металл в движение. И, кроме того, магнитодинамические установки своей функциональностью позволяют независимо управлять двумя главными параметрами литейных технологий – температурой металла (за счет нагрева металла индукционным током) и движением расплава (при электромагнитном перемешивании и разливке металла).

В то же время развитие современной техники обусловило необходимость повышения напорных, расходных и эксплуатационных характеристик такого МГД оборудования.

Анализ результатов выполненных ранее исследований МГД-процессов на границах и в рабочей зоне МДУ, а также оценка факторов, снижающих эффективность работы магнитодинамических установок для алюминиевых сплавов [1], показали, что основной резерв повышения напорных и расходных характеристик МДУ связан с уменьшением рассеивания и повышением концентрации в рабочей зоне (р. з.) силовых линий магнитного поля, создаваемого электромагнитом, снижением негативного влияния вихревых структур, образующихся по границам рабочей зоны в результате спада магнитного поля, а также с нейтрализацией эффекта втягивания жидкого металла в р. з., обусловленного взаимодействием магнитного поля тока в жидкометаллическом проводнике с магнитным полем в сердечнике электромагнита.

Для решения таких задач необходимо изучить процессы распределения магнитных полей в тройниковой рабочей зоне МДУ в сочетании с распределением плотности индуцируемого тока; исследовать магнитогидродинамические взаимодействия в р. з., приводящие к генерированию объемных электромагнитных сил и возникновению течений жидкого металла; определить концептуальные подходы по совершенствованию геометрии каналов и рабочей зоны МДУ, модернизации ее электромагнитных систем, которые позволяют повысить величину и стабилизировать напорные, расходные и эксплуатационные характеристики магнитодинамических установок.

Обсуждение результатов исследований

Для расширения представлений о механизмах возникновения магнитогидродинамических эффектов в каналах и рабочей зоне МДУ, негативно влияющих на

гидравлические и эксплуатационные характеристики таких установок, были исследованы электромагнитные процессы в тройниковой р. з. МДУ при различных режимах ее работы.

На первом этапе исследований изучали влияние элементов конструкции металлического кожуха канала 1 МДУ (рис. 1) на распределение (искажение, рассеивание, поглощение) магнитного поля, создаваемого внешним электромагнитом 4, 5.

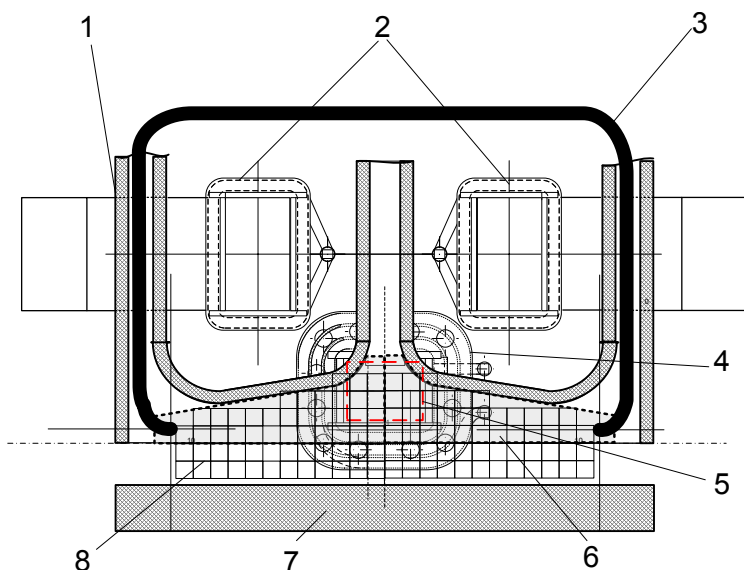


Рис. 1. Схема Ш-образного канала МДУ и методики использованной при исследовании распределения магнитной индукции в режиме имитации: 1 – Ш-образный канал (огнеупорная вставка из калиевого фторфлогопита); 2 – индукторы; 3 – гибкий кабель; 4 – катушка электромагнита; 5 – проекция полюса электромагнита в р. з.; 6 – алюминиевая пластина, замещающая жидкий металл; 7 – съемная донная часть канала; 8 – матрица точечных измерений распределения магнитной индукции (шаг 20×20 мм)

На втором этапе были исследованы особенности распределения магнитных полей в окрестности тройниковой р. з. в условиях имитации наличия в ней металла путем помещения на горизонтальную полость Ш-образного канала МДУ алюминиевой пластины 6 (рис. 1), повторяющей огибающую окрестности тройниковой р. з. МДУ. При этом протекание по ней переменных токов повышенной плотности обеспечивалось с помощью собственных электромагнитных систем 2 (индукторов).

Для систематизации экспериментальных данных по распределению магнитной индукции и построению ее топографий использовали вертикальную координатную матрицу 8-точечных измерений индукции магнитного поля в тройниковой р. з. МДУ (рис. 1). Матрица состоит из ячеек с шагом 20 мм по ширине и высоте в соответствии с габаритами измерительной головки датчика индукции. Для исследования распределения магнитной индукции по координатной матрице, выполненной в соответствии с геометрией огибающей горизонтального участка Ш-образного канала в окрестности тройниковой р. з., был изготовлен шаблон 8, который помещали в полость канала МДУ. При проведении экспериментов для установки датчиков индукции в полости тройниковой рабочей зоны донную съемную часть канала 7 МДУ снимали.

На этапе отработки методики исследований характеристик распределения магнитной индукции в тройниковой р. з. МДУ и ее окрестности использовали одновекторный (1D) датчик индукции, в котором в качестве чувствительного элемента применяли катушку с фиксированным количеством витком из медного провода ($\varnothing 0,2$ мм). При размещении этого датчика в поле силовых магнитных

линий в обмотке датчика наводилась ЭДС, пропорциональная нормальной составляющей магнитной индукции B . Пересчет ЭДС в величину магнитной индукции B в межполюсном зазоре производили по следующему соотношению:

$$B = \frac{E_{\text{дат}}}{2\pi f s w} = \frac{E_{\text{дат}} \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10,8 \cdot 10^{-4}} = 2,95 \cdot E_{\text{дат}} \quad (1)$$

где B – индукция магнитного поля, Тл; $E_{\text{дат}}$ – напряжение на выводах катушки датчика индукции, мВ; f – частота переменного поля, Гц; $s w = 10,8 \cdot 10^{-4}$ (величина произведения площади измерительной катушки датчика на количество ее витков).

С целью детального изучения «пространственного» распределения магнитного поля в тройниковой р. з. МДУ и ее окрестности и записи мгновенных значений векторных составляющих магнитной индукции был разработан 3-векторный датчик (3D), позволяющий реализовать непрерывное измерение нормальной (Z) и двух тангенциальных составляющих (X, Y) индукции магнитного поля (рис. 2). Поля рассеивания (распределение нормальной и тангенциальных составляющих индукции магнитного поля) вблизи тройниковой р. з. МДУ определяли с помощью аппаратуры, обеспечивающей одновременное 3-векторное измерение параметров магнитного поля в заданной точке пространства.

Известные феррозондовые приборы такого типа [3], обладая высокой чувствительностью, предназначены для измерения слабых магнитных полей (менее 0,001 Тл), но не работают при измерении параметров магнитных полей (свыше 0,1 Тл). Поэтому для решения такой задачи был разработан и изготовлен прибор с верхним измеряемым значением индукции магнитного поля до 1,0 Тл. Этот прибор состоит из 3-векторного (3D) датчика индукции магнитного поля и блока электроники, выдающего три выходных сигнала (U_x, U_y, U_z), на которых переменное напряжение пропорционально напряженности магнитного поля в трех взаимно перпендикулярных направлениях в точке расположения датчика. 3D датчик индукции состоит из шести датчиков Холла, смонтированных в виде куба с ребром 6 мм. Сигналы от параллельно расположенных пар датчиков суммируются. Таким образом, в случае неоднородного магнитного поля происходит усреднение измеряемой величины индукции внутри пары датчиков, а в общем случае выходные сигналы (U_x, U_y, U_z) характеризуют одну пространственную точку измерения, находящуюся в геометрическом центре симметрии куба, образованного датчиками Холла (рис. 2).

Блок электроники состоит из трех дифференциальных усилителей (по два на каждом канале) с глубоким подавлением синфазных помех, которые в данном случае значительно превосходят полезный сигнал, и трех сумматоров, на выходе которых переменное напряжение пропорционально векторам напряженности магнитного

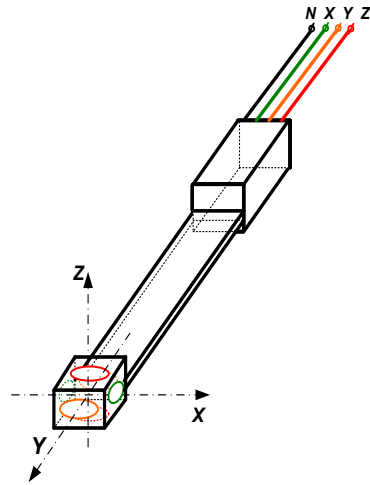


Рис. 2. Схема 3-векторного датчика индукции: X – канал по горизонтали (тангенциальная составляющая); Y – канал по вертикали (тангенциальная составляющая); Z – канал по нормали (нормальная составляющая); N – общий вывод (масса)

поля в заданной точке в трех взаимно перпендикулярных направлениях X , Y , Z относительно общего заземления. Схемы различных каналов идентичны.

Исследования распределения магнитной индукции, полей рассеивания, а также влияния элементов конструкции канала в окрестности рабочей зоны и систем индуцирования электрических токов в их взаимосвязи, производилось в три этапа:

- при включенном электромагните МДУ;
- при включенном электромагните и установленной в канале алюминиевой пластине, повторяющей геометрию горизонтального участка Ш-образного канала в области тройниковой р. з.;
- при включенном электромагните и установленной в канал алюминиевой пластины с пропусканием через нее электрического тока, индуцированного собственными электромагнитными системами индукторов МДУ.

Эксперименты проводили с использованием датчиков 1D и 3D. С помощью датчика 1D определяли значения ЭДС в характерных точках матрицы δ (рис. 1), которые затем пересчитывали в реальные значения магнитной индукции, используя выражение (1). Полученные результаты измерений соответствовали значениям нормальной составляющей магнитной индукции по оси Z . Для исследования тангенциальных составляющих (X , Y) магнитной индукции в окрестности р. з. МДУ датчик размещали так, чтобы ось симметрии обмотки датчика была параллельна оси X и Y соответственно по ширине или высоте р. з.

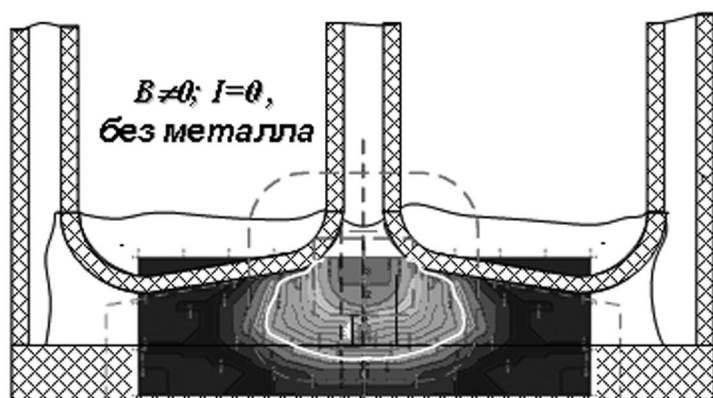
При использовании трехмерного датчика 3D, для обеспечения возможности анализа процессов распределения нормальной и тангенциальных составляющих индукции магнитного поля выводы датчика подключали к аналогово-цифровому преобразователю (АЦП) и производили запись экспериментальных данных в виде массива данных в ЭВМ по трем каналам одновременно в реальном масштабе времени с частотой опроса каналов датчиков 500 Гц. Амплитудные значения ЭДС по нормальной и двум тангенциальным составляющим далее пересчитывались в величины магнитной индукции, по которым строили топографии и трехмерные графики распределения магнитных полей в окрестности тройниковой р. з. МДУ.

На первом этапе исследований в качестве базовой картины распределения нормальной составляющей магнитной индукции в тройниковой р. з. и ее окрестности за основу взяли топографию при включенном электромагните в «чистом» виде (без наличия в межполюсном пространстве тройниковой р. з. жидкометаллического проводника), без включения электромагнитных систем индукторов МДУ, рис. 3, а.

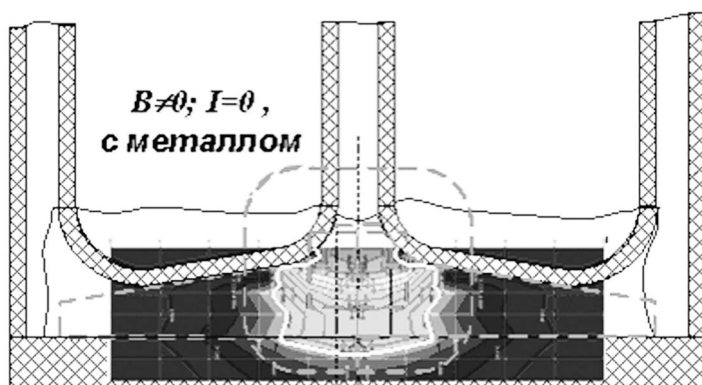
Результаты экспериментальных исследований показали, что в зонах (рис. 3, а), соответствующих 1-й и 2-м четвертям плоскости относительно полюса электромагнита, происходит искажение распределения силовых линий магнитного поля в результате взаимодействия с материалом кожуха Ш-образного канала МДУ. Зона максимальных значений нормальной составляющей магнитной индукции находится в окрестности проекции полюса электромагнита 5, а по отношению к плоскости тройниковой р. з. плотность индукции (значением не ниже 0,05 Тл) распределена на 35-40 % ее площади, где и создается электромагнитное давление. Максимальное значение магнитной индукции соответствует центру полюса электромагнита.

На следующем этапе исследований для изучения влияния помещенного в р. з. металла (алюминия) на распределение магнитной индукции, создаваемой внешним электромагнитом МДУ, в качестве замещения наличия металла использовали алюминиевую пластину 6 из сплава АК7ч толщиной 8 мм, форма которой соответствовала геометрии горизонтального участка Ш-образного канала МДУ (см. рис. 1).

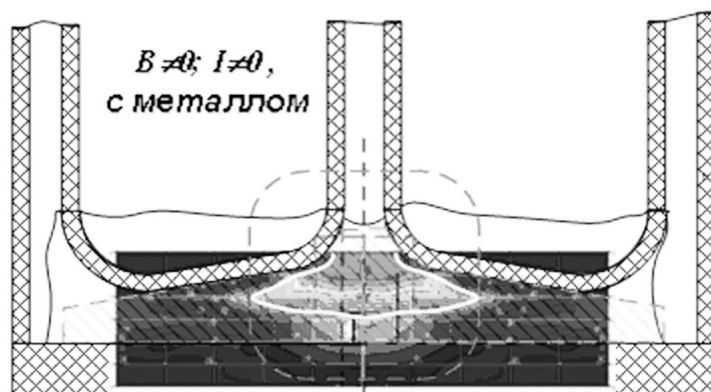
Анализ топографий магнитной индукции при наличии «имитатора» наличия металла (рис. 3, б) показал характерное для режима имитации «выпучивание» нормальной составляющей магнитной индукции по вертикали и сужение по горизонтали (белая линия соответствует величине, равной 20 % от номинального значения магнитной индукции), связанное с взаимодействием внешнего магнитного поля, с образующимися в токопроводящем алюминиевом проводнике вихревыми токами



а



б



в

Рис. 3. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции в тройниковой р. з. МДУ в режиме имитации: а – при включенном электромагните и отсутствии в канале алюминиевой пластины; б – при наличии установленной на горизонтальном участке Ш-образного канала алюминиевой пластины, замещающей наличие жидкометаллического проводника; в – при размещенной на горизонтальном участке тройниковой р. з. алюминиевой пластины (имитатора), по которой проходил переменный ток повышенной плотности

и их контурами, увеличивающими для магнитного поля противодействующее реактивное сопротивление. При этом абсолютное значение нормальной составляющей индукции с увеличением напряжения питания обмоток электромагнита изменялось пропорционально повышению напряжения, подаваемого на обмотки электромагнита, однако характер распределения полей рассеивания не изменился.

При исследовании влияния магнитогидродинамических процессов в рабочей зоне магнитодинамических установок на их эксплуатационные характеристики особый интерес представляет режим имитации работы тройниковой р. з. в процессе пропускания через алюминиевую пластину 5 индуцированного тока и наложения внешнего магнитного поля. Для этого на горизонтальном участке Ш-образного канала помещали алюминиевую пластину 5 (см. рис. 1), а ее левый и правые торцы соединяли медным кабелем 3 сечением 150 мм², пропуская его через полости боковых ветвей Ш-образного канала 1. В этом случае в Ш-образном канале МДУ создавали замкнутый электрический контур, соответствующий электрической цепи протекания токов, индуцируемых индукторами 2 при их синфазном включении.

При проведении экспериментов магнитодинамическую установку включали в режим «насос». На каждую из обмоток индукторов подавали одинаковые напряжения величиной по 42, 53 и 57,5 В, а на обмотки электромагнита – 45, 53 и 60 В соответственно.

Оценка перераспределения плотности нормальной составляющей магнитной индукции в тройниковой р. з. МДУ в этом режиме имитации показала, что концентрация нормальной составляющей магнитной индукции в области выпускного патрубка р. з. по сравнению с распределением индукции магнитного поля без влияния индуцированного тока усиливается на 25 %, а в нижней части р. з. снижается до 15 % (рис. 3, в). При этом эффективная площадь р. з., где создаются объемные электромагнитные силы, составляет не более 60 % от ее фактического значения.

Графически перераспределение (алгебраическая разность) нормальной составляющей магнитной индукции, обусловленное влиянием магнитного поля, протекающего по металлическому проводнику в р. з. и ее окрестностях, показано на рис. 4.

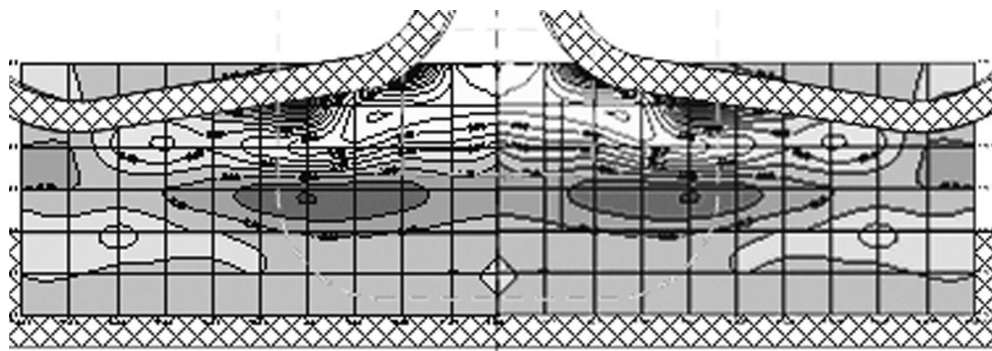


Рис. 4. Топография перераспределения нормальной составляющей индукции магнитного поля в тройниковой р. з. МДУ в режиме имитации (при установленной в качестве замещения жидкометаллического проводника алюминиевой пластине, по которой проходил переменный ток повышенной плотности), обусловленная влиянием магнитного поля, наводимого током на горизонтальном участке

Установленный МГД-эффект (рис. 3, а, в; 4) можно классифицировать как реакцию тройниковой рабочей зоны МДУ [4], которая является результатом взаимодействия внешнего переменного магнитного поля, генерируемого электромагнитом, с переменным магнитным полем, созданным жидкометаллическим проводником в горизонтальном участке Ш-образного канала, имеющим встречное направление по отношению к внешнему магнитному полю в нижней части рабочей зоны и согласное направление в его верхней части.

Влияние реакции тройниковой рабочей зоны усиливается с увеличением составляющей плотности тока j в р. з. и обуславливает неравномерность распределения индукции, что приводит к снижению эффективности электромагнитных взаимодействий и возникновению зон дифференцированного распределения как объемных электромагнитных сил, так и развиваемого МДУ электромагнитного давления.

Прикладной результат влияния реакции тройниковой рабочей зоны на эксплуатационные характеристики работы МДУ исследован на примере изучения напорных характеристик МДУ в зависимости от параметров работы индукторов и электромагнита [5], где показано, что с увеличением напряжения, подаваемого на обмотки индукторов, угол наклона напорных характеристик уменьшается, а зависимость коэффициента угла напорных кривых теряет линейность.

Наряду с этим, исследование тангенциальной составляющей индукции в данном случае (по схеме рис. 1) по оси Y , соответствующей составляющей магнитного поля, индуцируемого в тройниковой р. з. переменным электрическим током, проходящим по алюминиевой пластине, показало наличие максимального сосредоточения плотности индукции в нижней части р. з. (рис. 5), а также наличие угла сдвига фаз переменных магнитных полей от 23° до 43° ($0,18-0,28 \pi$).

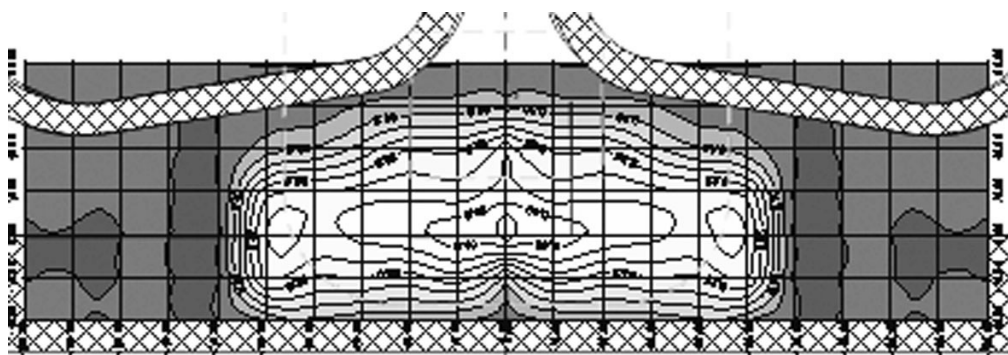


Рис. 5. Топография распределения тангенциальной (по оси Y) составляющей индукции магнитного поля, индуцируемого в тройниковой р. з. переменным электрическим током, проходящим по алюминиевой пластине

Представленное распределение индукции магнитного поля, созданного переменным электрическим током (рис. 5), полученное экспериментальным путем при имитации работы МДУ в основном ее режиме «насос», качественно предопределяет картину перераспределения составляющей плотности тока j в р. з. и ее окрестности в результате взаимодействия с внешним магнитным полем электромагнита и характеризуется смещением (выталкиванием) линий тока в зону, удаленную от проекции полюсов электромагнита. Аналогичные исследования, проведенные ранее, показывают такую же тенденцию [1]. Однако с использованием новой методики и средств трехмерных измерений распределения индукции магнитного поля в р. з. МДУ были получены новые качественные представления, поясняющие механизм влияния магнитогидродинамических процессов, происходящих в р. з., на ее работу.

Анализ перераспределения нормальной и тангенциальных составляющих индукции магнитного поля, создаваемых, в частности, внешним электромагнитом и переменным электрическим током, проходящим вдоль горизонтального участка р. з. Ш-образного канала, показал наличие ряда МГД-эффектов, основанных на природе электромагнитных взаимодействий и оказывающих в данном случае негативное влияние на создаваемую электромагнитную силу, а также снижающих гидравлический напор и стабильность его реализации.

Характерной особенностью влияния работы МДУ на эксплуатационные характери-

стики является образование существенного перепада значений нормальной составляющей магнитной индукции в р. з. и ее окрестности, приводящего к образованию перепадов электромагнитного давления и величины объемных электромагнитных сил в ней. Анализ топографии (см. рис. 3, в) показывает, что на расстоянии 50-60 мм от вертикальной кромки проекции полюса электромагнита по горизонтали происходит спад абсолютного значения нормальной составляющей магнитной индукции до 50 %, а на расстоянии до 80 мм – 80 %. Спад индукции по вертикали в р. з. от нижней кромки полюса электромагнита на расстоянии 50 мм составляет более 85 %. Результат такого перепада индукции в двухмерной плоскости р. з. обуславливает существенный перепад величины объемных электромагнитных сил и создаваемого ими электромагнитного давления в тройниковой р. з., в которой происходит поворот на 90° линий тока потока расплава, поступающего из боковых ее патрубков к центральному, и образование на границах р. з. объемных динамических вихревых структур. Такие вихревые структуры имеют широкий диапазон воздействий на гидравлические характеристики МДУ и гидродинамические процессы в каналах и рабочей зоне установки. При низких скоростях движения расплава по каналам МДУ (до 1 м/с) и повышенных плотностях токов в каналах наблюдается усиление осцилляции скоростного напора и электромагнитного давления (10-20 % от его номинального значения с частотой от 1 до 3 Гц). В процессе перехода в область средних скоростей движения металла (свыше 1 м/с) при высоких плотностях токов за счет турбулизации потоков в окрестности р. з. и на выходе из нее происходит стабилизация осцилляции напорных характеристик, которые не превышают 10-15 %. Однако частота осцилляций приобретает одну или две дополнительные (2 и 3-ю) гармоники – 0,4-0,8; 2,5-3,0; 3,4-4,0 Гц [6]. В случае низких значений плотностей токов в каналах МДУ и при низких скоростях движения расплава в трубопроводах каналов или при отсутствии таковых наблюдается дестабилизация напорных характеристик с развитием осциллирующей составляющей, что объясняется развитием в окрестностях р. з. МДУ мощных вихревых структур, поглощающих значительную часть энергии создаваемого в р. з. электромагнитного давления.

В целом процесс поддержания избыточного давления на выходе из р. з. может сопровождаться его осцилляциями с переходом в зону «провала», что является результатом сжатия встречно вращающихся вихревых структур и их расталкивания вследствие искажения их геометрии от окружности к эллиптической форме [7].

Другим важным аспектом, определяющим влияние магнитогидродинамических процессов на эксплуатационные характеристики работы МДУ, является влияние электромагнитных процессов взаимодействия магнитных полей токов, индуцируемых в жидкометаллическом проводнике в канале МДУ, с элементами конструкции электромагнита. Это воздействие характеризуется возникновением эффекта «втягивания» и, как результат, образованием отрицательного вектора электромагнитного давления в р. з., величина которого составляет 20-25 % от величины напорных характеристик МДУ. При этом электромагнитное давление, создаваемое в МДУ, составляет 30-35 кПа, а потеря давления за счет наводок в отключенном электромагните – от 6,0 до 8,75 кПа.

В результате экспериментальных исследований, направленных на анализ и изучение магнитогидродинамических процессов в МДУ, уточнены представления о роли особенностей геометрии р. з., местах расположения и геометрии полюсов С-образного электромагнита, а также о механизмах перераспределения составляющих плотности тока и нормальной составляющей внешнего магнитного поля в проекции тройниковой рабочей зоны.

Среди перспективных направлений дальнейших исследований является оптимизация процессов перераспределения нормальной составляющей магнитной индукции в р. з. и ее окрестностях с целью более рационального использования

рабочего объема р. з. для создания объемных электромагнитных сил, оптимизации магнитогидродинамических процессов в ней, стабилизации и повышения эксплуатационных и технических характеристик магнитодинамических установок.

Выводы

- Разработаны методика «пространственного 3-D измерения» параметров распределения магнитных полей и 3-векторный датчик индукции, позволяющий производить одновременную в реальном масштабе времени регистрацию мгновенных значений нормальной (по оси Z) и двух тангенциальных (по осям X и Y) составляющих индукции магнитного поля с использованием в качестве чувствительного элемента датчиков Холла.

- Экспериментально исследованы топографии распределения индукции в р. з. и ее окрестностях, в том числе для условий имитации работы МДУ, приближенных к реальным. Установлено, что распределение максимальных значений нормальной составляющей магнитной индукции в проекции р. з. сконцентрировано в зоне выпускного патрубка. При этом эффективная площадь р. з., где создаются объемные электромагнитные силы, составляет до 60 % от ее фактических значений.

- Экспериментально установлено, что распределение нормальных составляющих индукции в 3 и 4-й четвертях р. з. внешнего магнитного поля и наводимого током, протекающим по горизонтальному участку Ш-образного канала, обуславливает неравномерность распределения индукции в рабочей зоне (реакция тройниковой рабочей зоны), что приводит к снижению эффективности электромагнитных взаимодействий в р. з. и возникновению зон дифференцированного распределения как объемных электромагнитных сил, так и развиваемого МДУ электромагнитного давления.

- Исследованием закономерностей распределения тангенциальной составляющей индукции магнитного поля, индуцируемого в тройниковой р. з. электрическим током, проходящим по алюминиевой пластине (имитаторе), установлены тенденция к максимальному сосредоточению плотности индукции в нижней части р. з., а также наличие угла сдвига фаз переменных магнитных полей от 23 до 43 ° (0,18-0,28 π).



Список литературы

1. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / В. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 256 с.
2. Слажнев Н. А. Система коррекции расходных характеристик магнитовесовой установки при переменном уровне расплава в тигле // *Металл и литье Украины*. – 2011. – № 8. – С. 34-40.
3. Афанасьев Ю. В. Феррозондовые приборы. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 188 с.
4. Верте Л. А. Магнитная гидродинамика в металлургии. – М.: Металлургия, 1975. – 288 с.
5. Исследование влияния амплитуды и частоты питающего тока на гидравлический напор магнитодинамической установки / В. Н. Фикссен, В. И. Дубоделов, А. О. Горшков и др. // *Технічна електродинаміка*. – 2001. – № 2. – С. 15-19.
6. Стабилизация заданного уровня металла в магнитодинамических установках / В. Н. Фикссен, В. И. Дубоделов, Н. А. Слажнев и др. // *Процессы литья*. – 2002. – № 1. – С. 33-38.
7. Моисеев Ю. В., Личак А. И. Автоматизация специальных способов литья // Там же. – 2008. – № 1. – С. 20-29.

Поступила 16.04.2013