

УДК 621.746.2:66.028

Н. А. Слажнев, К. С. Богдан, А. Ю. Кизилова, А. О. Горшков

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В МАГНИТОДИНАМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ДЛЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ. Сообщение 1

В статье заложен цикл научных исследований по изучению закономерностей электромагнитных силовых взаимодействий в существующих магнитодинамических установках для алюминиевых сплавов на основе теоретического и прямого экспериментального анализа МГД-процессов. В сообщении 1 приведены результаты экспериментальных исследований закономерностей создания в рабочей зоне установки нормальной составляющей электромагнитной силы в зависимости от напряжения питания индукторов и электромагнита с использованием функциональных возможностей установки с интегрированной весоизмерительной системой в режиме «насос». Установлены корреляционные закономерности создания электромагнитной силы, проведена аналитическая проверка адекватности таких моделей.

Ключевые слова: магнитовесовая установка, эксплуатационные характеристики, напор, электромагнитная сила, весоизмерительная система, силовые взаимодействия, электромагнит, индуктор, алюминиевый сплав.

У статті закладено цикл наукових досліджень по вивченню закономірностей електромагнітних силових взаємодій в існуючих магнітодинамічних установках для алюмінієвих сплавів на основі теоретичного і прямого експериментального аналізу МГД-процесів. У повідомленні 1 наведено результати експериментальних досліджень закономірностей створення у робочій зоні установки нормальної складової електромагнітної сили в залежності від напруги живлення індукторів і електромагніту з використанням функціональних можливостей установки з інтегрованою ваговимірювальною системою у режимі «насос». Встановлено кореляційні закономірності створення електромагнітної сили, проведено аналітична перевірка адекватності таких моделей.

Ключові слова: магнітовагова установка, експлуатаційні характеристики, напір, електромагнітна сила, ваговимірювальна система, силові взаємодії, електромагніт, індуктор, алюмінієвий сплав.

The article based on the series of scientific studies on the laws of electromagnetic interactions in existing magnetodynamic installations for aluminum alloys on the basis of theoretical and experimental analysis of direct MHD processes. The first report presents the result of experimental studies of regularities of creating the work area setting of the normal component of the electromagnetic force, depending on supply voltage and inductor electromagnet with features units with integrated weighing system in the «pump». Correlation patterns create of electromagnetic field

in MDI, analytical check of such models on adequacy was perform. MDN-6A using the functionality of the installation-stey magneto-weighting (MWI) with integrated weighing system (IWMS) in the "pump". Correlation patterns create of electromagnetic field in MDI, analytical check of such models on adequacy was perform.

Keywords: magnet-weight installation, performance, pressure, electromagnetic force, weight-measuring system, electromagnet, inductor, aluminum alloy.

Введение

Комплексные исследования и разработки, направленные на совершенствование технологических возможностей литейных магнитодинамических установок (МДУ) по реализации ряда важнейших операций рафинирования, приготовления и доводки по химическому составу [1, 2, 3], а также повышение эксплуатационных характеристик таких установок, находят своё промышленное применение, имея при этом прикладной результат, удовлетворяющий уровню требований в современном литейном производстве как в Украине, так и за рубежом [4].

Для совершенствования существующих МДУ для алюминиевых сплавов как миксеров-дозаторов, так и заливочного оборудования, на сегодняшний день разработан ряд комплексных технологических решений, предопределяющих МГД-установки как агрегаты, соответствующие уровню современного литейного и металлургического оборудования, реализующего управляемую подачу расплава в литейную форму, дозирование с высокой точностью (погрешность не более 1,5 %) и в широком диапазоне доз (от 0,3 до 400 кг), а также с возможностью широкого управления расходными характеристиками заливаемого в форму расплава (от 0,05 до 10 кг/с) [5-7]. Особое внимание уделяется вопросам управления, контроля, энерго- и ресурсосбережения с точки зрения предопределения высокого уровня конкурентоспособности и рентабельности МГД-оборудования в современной литейном производстве.

На сегодняшний день главные приоритеты исследований и разработок учёных в области магнитной гидродинамики (МГД) сконцентрированы на создании новых концептуальных подходов и принципов работы литейного МГД-оборудования, разработке оригинальных конструктивных решений, направленных на существенное расширение диапазона рабочих и эксплуатационных характеристик и повышение КПД таких агрегатов, а также их ресурсо- и энергосбережение.

Совершенствование существующего МГД-оборудования и, особенно, создание новых концептуальных решений разработки нового с целью расширения функциональных, технических и эксплуатационных характеристик на первом этапе комплексных научных исследований требует проведения полномасштабного, многофакторного исследования закономерностей электромагнитных силовых взаимодействий электрического тока, индуцируемого индукторами, с внешним магнитным полем в рабочей зоне (р. з.) МДУ при создании электромагнитной силы, а также их взаимодействия с элементами конструкции МДУ.

Изложение основного материала

Возможность изучения и систематизации закономерностей гидродинамических, электромагнитных, пондеромоторных и силовых взаимосвязей, возникающих между жидким металлом и электромагнитными системами МДУ, появилась с разработкой магнитовесовой установки (МВУ) [8]. МВУ, как комбинированная с весоизмерительной системой (ВИС) МДУ, позволила на высоком современном уровне решить задачу непрерывного, как статического, так и динамического, контроля фактической массы находящегося в тигле и каналах МДУ расплава, производить высокоточное измерение динамики изменения её величины во времени в процессах дискретной разливки и обеспечить управляемую реализацию метода дозирования «по массе» в диапазоне доз от 2 до 400 кг с относительной погрешностью от 2 до 0,5 %.

Магнитовесовая установка с интегрированной весоизмерительной системой (МВУ с ИВИС) является концептуальным продолжением модернизации магнитодинамической установки типа МДН-6А путём обеспечения непрерывного контроля

текущего (мгновенного) значения массы расплава, находящегося в тигле и каналах МДУ, регистрации и управления процессами дискретного дозирования открытой струей методом «отсоединения массы» [9].

Особенностью МВУ с ИВИС является то, что силоизмерительные тензорезисторные датчики 4 (рис. 1) установлены непосредственно под тиглем 1 МДУ и на их силовые входы действует сила, созданная только суммарной массой тигля с каналом 2 и металлопроводом 3 и переменная масса расплава 13. Это решение позволило снизить измеряемую массу m_{Σ} «брутто» МДУ с $m_{\Sigma} = 4200$ кг при использовании платформенных весов, на которые устанавливалась МДУ, до массы «брутто» $m'_{\Sigma} = m_T + m_{\Phi} + m_M + m_P = 1800$ кг (в 2,5 раза), где весоизмерительной системой измеряется масса тигля $m_T = 300-500$ кг, масса футеровки $m_{\Phi} = 300-500$ кг, масса металлопровода $m_M = 2-10$ кг, максимальная масса алюминиевого расплава (при полном тигле) $m_P = 160-630$ кг.

Опытно-промышленная проверка функционирования МВУ с ИВИС, наряду с контролем текущего значения массы расплава в тигле и канале МВУ, показала возможность регистрации в реальном масштабе времени силового электромагнитного взаимодействия жидкометаллического витка с током с внешним магнитным полем С-образного электромагнита.

При работе МДУ на находящийся в Ш-образном канале, рабочей зоне и тигле расплав оказывает комплексное силовое электромагнитное воздействие, регистрируемое в реальном масштабе времени в весовом эквиваленте (кг) с помощью ИВИС. При этом величина «силового» электромагнитного взаимодействия – $\Sigma F_{\text{эм}}$ имеет отрицательное значение, так как (рис. 1) нормальная составляющая вектора электромагнитных сил, создаваемых в р. з. МДУ, направлена в противоположную сторону действия силы тяжести $F = mg$, тем самым осуществляя эффект «разгрузки» взвешиваемой с помощью ИВИС конструкции тигель-канал-расплав на величину, пропорциональную действующему значению пульсирующих электромагнитных сил [1, 9].

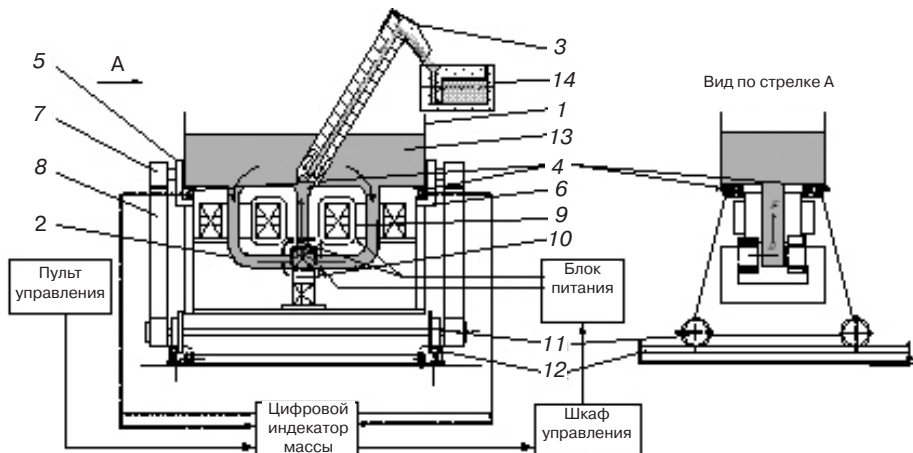


Рис. 1. Структурно-функциональная схема магнитовесовой установки с интегрированной весоизмерительной системой (МВУ с ИВИС)

Регистрируемое значение $\Sigma F_{\text{эм}}$ является векторной суммой действующих значений нормальных составляющих: $F_{\text{эм.сил}}$ – электромагнитная сила создаваемая в р. з. МДУ, Н; $F_{\text{реак.констр.}}$ – силовое электромагнитное взаимодействие магнитного поля электромагнита B с металлоконструкцией Ш-образного канала в окрестности полюсов электромагнита, Н; $F_{\text{эм.взаимод}}$ – переменный электрический ток I на горизонтальном участке Ш-образного канала в окрестности р. з. МДУ с С-образным магнитопроводом электромагнита, Н; $F_{\text{рад.сила}}$ – электромагнитная сила, обусловленная взаимодействием тангенциальной составляющей тока I в канале и магнитного поля индукторов (радиальная сила), Н.

Ранее, до создания МВУ с ИВИС, контроль величины, создаваемой в МДУ электромагнитной силы, осуществлялся несколькими способами [11]. Однако ни один из них не применяли в качестве средства контроля и управления электромагнитным давлением, а сведений о применении указанных подходов для исследования составляющих электромагнитных взаимодействий в МДУ не имеется.

Отличие функциональных возможностей МВУ с платформенной ВИС и МВУ с ИВИС можно представить путём сравнения уравнений баланса сил.

Для случая МВУ с платформенными весами в левой части уравнения (1) записана сумма сил, действующих на ВИС (в весовом эквиваленте), а в правой – регистрируемые значения массы; кг:

$$(m_{\text{мет.тиг.}} + m_{\text{констр.}}) \cdot g = F(m_{\text{ВИС}}) \cdot g, \quad (1)$$

где $m_{\text{констр.}} = (m_{\text{т}} + m_{\text{ф}} + m_{\text{к}} + m_{\text{м.п.}} + m_{\text{ш}} + m_{\text{эм.сист.}}) + m_{\text{мет.кан.}} = 4230$.

Диапазон вариации величины $F(m_{\text{ВИС}})$ для платформенной ВИС, на которую установлена МДН-6А-0,63-М, составляет 4230-4830 кг.

Для случая МВУ с ИВИС, уравнение баланса сил не имеет составляющей массы шасси и электромагнитных систем ($m_{\text{ш}} + m_{\text{эм.сист.}} = 0$), но при работе МДУ в режимах создания электромагнитного давления имеет дополнительные «нормальные» составляющие силовых электромагнитных взаимодействий, кг:

$$\begin{aligned} & (m_{\text{т}} + m_{\text{ф}} + m_{\text{к}} + m_{\text{м.п.}}) \cdot g - (F_{\text{эм.сил.}} + F_{\text{реак.констр.}} + F_{\text{эм.взаимод.}} + F_{\text{рад.сил.}}) = \\ & = F(m_{\text{ИВИС}}) \cdot g, \end{aligned} \quad (2)$$

где $F(m_{\text{ВИС}}) \cdot g$ – величина, измеряемая ИВИС, преобразованная в силу, пропорционально весовому эквиваленту, Н; $m_{\text{мет}}$ – масса расплава в тигле и канале МДУ (30-630), кг; $m_{\text{т}}$ – масса тигля МДН-6А-0,63-М (500), кг; $m_{\text{ф}}$ – масса футеровки (500), кг; $m_{\text{к}}$ – масса канала (≈ 160), кг; $m_{\text{м.п.}}$ – масса металлопровода, термодпары, прочих приспособлений, кг.

Исследование силовых взаимодействий

Для изучения и систематизации закономерностей электромагнитного силового взаимодействия в работе проводили экспериментальные исследования на магнитодинамической установке типа МДН-6А-0,25-М, оснащённой ИВИС с использованием алюминиевого расплава марки АК7 массой от 100 до 500 кг при температуре 680-740 °С.

Для выделения «эквивалентов силовых взаимодействий» в чистом виде перед включением магнитодинамической установки в режим «насос» на весоизмерительном индикаторе ИВИС производили обнуление величины «тара», определяющей статическую нагрузку на ИВИС $(m_{\text{т}} + m_{\text{ф}} + m_{\text{к}} + m_{\text{м.п.}}) \cdot g = 0$. При включении МДУ в режим «насос» на индикаторе ИВИС выводилась величина $(m_{\text{ИВИС}})$, характеризующая суммарное значение силового воздействия электромагнитных сил и силовых электромагнитных взаимодействий в весовом эквиваленте, кг, $(\sum F_{\text{эм}} = (F_{\text{эм.сил.}} + F_{\text{реак.констр.}} + F_{\text{рад.сил.}}) / F(m_{\text{ИВИС}}))$.

Составляющая $F_{\text{эм.взаимод.}}$ величины силового электромагнитного взаимодействия переменного электрического тока на горизонтальном участке Ш-образного канала в окрестности р. з. МДУ с С-образным магнитопроводом электромагнита не влияла на величину создаваемой электромагнитной силы, так как магнитный поток $F_{\text{эм.взаим}}$ компенсировался магнитным потоком F_0 , индуцируемым обмотками электромагнита $(F = F_0 - F_{\text{эм.взаим}}, F_0 \gg F_{\text{эм.взаим}})$.

При изучении закономерностей «силовых» электромагнитных взаимодействий в МДУ – $\sum F_{эм}$, в работе было принято использовать в качестве аргумента (параметра управления) величину напряжения, подаваемого непосредственно на обмотки индукторов ($U_{инд}$) и электромагнита ($U_{эм}$) – $\sum F_{эм} = f(U_{инд}, U_{эм})$. Величина электрического напряжения является основным параметром управления электромагнитными системами МДУ (индукторами и электромагнитом) при её работе в различных режимах (хранение, нагнетание, боковое перемешивание и т. д.), а закономерности их регулирования являются первостепенными при разработке специальных источников питания (ИП) электромагнитных систем МДУ и САУ (система автоматического управления). Для осуществления более глубокого анализа электромагнитных процессов взаимодействия индуцированного в Ш-образном канале МДУ электрического тока и индукции магнитного поля, как в магнитопроводе электромагнита, так и в межполюсном пространстве (в р. з.), установленные закономерности могут быть легко приведены к классическому выражению создания электромагнитных сил и электромагнитного давления в МДУ с тройниковой р. з. [1].

На первом этапе исследовали зависимость нормальной составляющей суммарных электромагнитных силовых взаимодействий ($\sum F_{эм} = f(U_{инд}, U_{эм})$) в МВУ с ИВИС при включении МДУ в режим «насос», при включении индукторов в синфазный режим (АВ-АВ) на ступени 1, 3 и 5 (соответственно 42, 60 и 80 В на каждую) и варьируемых значениях напряжений, подаваемых на электромагнит, от 40 до 80 В (ступени 1, 2, 3, 4, 5). Полученные экспериментальные данные показаны на рис. 2.

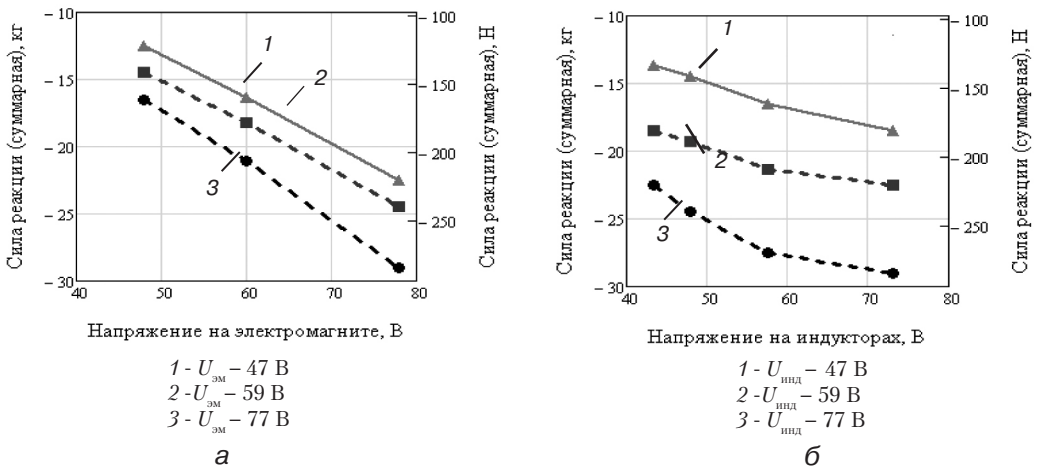


Рис. 2. Экспериментальные зависимости суммарных электромагнитных сил ($\sum F_{эм} = (F_{эм.сил.} + F_{реак.контр.} + F_{ред.сил.})$) от напряжения, подаваемого на электромагнит МДУ (а) – ($\sum F_{эм} = fU_{эм}$), для трёх значений напряжения питания индукторов при работе МДУ в режиме «насос» и напряжения, подаваемого на индукторы ($\sum F_{эм} = fU_{инд}$) – (б)

Экспериментальные зависимости ($\sum F_{эм} = f(U_{инд}, U_{эм})$), (рис. 2.), можно интерполировать к линейной корреляционной математической модели, - полиному 1 или 2-й степени. Первичная интерполяция (корреляционный анализ) экспериментальных зависимостей показала, что при использовании для интерпретации полиномиальных законов от 1 до 3-й степени коэффициенты 2 и 3-ой степени ($k_2 \cdot x^2$ и $k_3 \cdot x^3$), имеют значения порядка 10^{-3} и 10^{-5} , находятся в диапазоне погрешностей измерений экспериментальных величин и ими можно пренебречь. Наиболее приемлемым для анализа (рис. 2, а) принят тип корреляционной зависимости линейного уравнения 1-й степени типа $y(x) = k \cdot x + c$.

Аналитический вид зависимости ($\sum F_{эм} = fU_{эм}$), (рис. 2, а) от напряжения, подаваемого на обмотки электромагнита ($U_{эм}$ (40÷80 В) var) для 4-х значений $U_{инд}$ (43, 25, 58, 73 В) = const на индукторах, имеет вид:

$$\begin{aligned} \sum F_{\text{эм}}(U_{\text{инд}}=43,4, U_{\text{эм}}) &= (-0,309224 \cdot U_{\text{эм}} + 0,729145) \cdot g, R = 99,15 \% ; \\ \sum F_{\text{эм}}(U_{\text{инд}}=52,0, U_{\text{эм}}) &= (-0,325305 \cdot U_{\text{эм}} + 0,589465) \cdot g, R = 99,69 \% ; \\ \sum F_{\text{эм}}(U_{\text{инд}}=57,5, U_{\text{эм}}) &= (-0,364912 \cdot U_{\text{эм}} + 0,857896) \cdot g, R = 99,82 \% ; \\ \sum F_{\text{эм}}(U_{\text{инд}}=73,0, U_{\text{эм}}) &= (-0,350877 \cdot U_{\text{эм}} - 1,57895) \cdot g, R = 99,95 \% . \end{aligned} \quad (3)$$

Установленные зависимости (3) могут быть использованы для управления электромагнитным давлением МДУ в режиме «насос» путём регулирования напряжения ($U_{\text{эм}}$) независимо от параметров работы индукторов $U_{\text{инд}}$ (напряжения на индукторах МДУ), что позволит реализовать независимое управление режимом нагрева расплава при его электромагнитной разливке [12].

Анализ зависимостей влияния напряжения питания индукторов ($\sum F_{\text{эм}} = f(U_{\text{инд}})$) интерполировали к полиному 2-й степени (рис. 2, б). Зависимости от напряжения, подаваемого на индукторы ($U_{\text{инд}}$ (40÷80 В) – var), при неизменных значениях напряжения на электромагните ($U_{\text{эм}}$ (43, 52, 58, 73 В)) имеют вид (4):

$$\begin{aligned} \sum F_{\text{эм}}(U_{\text{инд}}, U_{\text{эм}}=48) &= (2,1855 \cdot 10^{-3} \cdot U_{\text{инд}}^2 - 0,419108 \cdot U_{\text{инд}} + 0,456612) \cdot g, \\ R &= 99,7\%; \\ \sum F_{\text{эм}}(U_{\text{инд}}=58, U_{\text{эм}}=60) &= (3,86597 \cdot 10^{-3} \cdot U_{\text{инд}}^2 - 0,589209 \cdot U_{\text{инд}} - 0,106744) \cdot g, \\ R &= 99,47\%; \\ \sum F_{\text{эм}}(U_{\text{инд}}=73, U_{\text{эм}}=78) &= (8,70144 \cdot 10^{-3} \cdot U_{\text{инд}}^2 - 1,23261 \cdot U_{\text{эм}} + 14,6097) \cdot g, \\ R &= 99,99\%. \end{aligned} \quad (4)$$

В приведении к двухфакторной зависимости ($\sum F_{\text{эм}} = f(U_{\text{инд}}, U_{\text{эм}})$) полученных экспериментальных данных (рис. 2, а, б), путём приведения к виду простой линейной плоскости вида: 1 – ($\sum F_{\text{эм}}(U_{\text{инд}}, U_{\text{эм}}) = k1 \cdot U_{\text{инд}} + k2 \cdot U_{\text{эм}} + c$); 2 – билинейная седловой функции ($\sum F_{\text{эм}}(U_{\text{инд}}, U_{\text{эм}}) = k1 \cdot U_{\text{инд}} + k2 \cdot U_{\text{эм}} + k3 \cdot U_{\text{инд}} \cdot U_{\text{эм}} + c$); и 3 – вид квадратичного полинома 2-й степени ($\sum F_{\text{эм}}(U_{\text{инд}}, U_{\text{эм}}) = k1 \cdot U_{\text{инд}} + k2 \cdot U_{\text{эм}} + k3 \cdot U_{\text{инд}} \cdot U_{\text{эм}} + k4 \cdot U_{\text{инд}}^2 + k5 \cdot U_{\text{эм}}^2 + c$), такие зависимости приобретают следующий вид (5) 4:

$$\begin{aligned} 1 - \sum F_{\text{эм}}(U_{\text{инд}}, U_{\text{эм}}) &= (-0,09229 \cdot U_{\text{инд}} - 0,3456 \cdot U_{\text{эм}} + 6,2683) \cdot g, R = 89\%; \\ 2 - \sum F_{\text{эм}}(U_{\text{инд}}, U_{\text{эм}}) &= \left(\begin{array}{l} -0,01126 \cdot U_{\text{инд}} - 0,2743 \cdot U_{\text{эм}} - \\ -0,001404 \cdot U_{\text{инд}} \cdot U_{\text{эм}} + 2,1729 \end{array} \right) \cdot g, R = 95,7\%; \\ 3 - \sum F_{\text{эм}}(U_{\text{инд}}, U_{\text{эм}}) &= \left(\begin{array}{l} -0,001093 \cdot U_{\text{инд}}^2 - 0,000794 \cdot U_{\text{эм}}^2 - \\ +0,065497 \cdot U_{\text{инд}} - 0,22967 \cdot U_{\text{эм}} - \\ -0,0006 U_{\text{инд}} \cdot U_{\text{эм}} - 0,950214 \end{array} \right) \cdot g, R = 99,47\%. \end{aligned} \quad (5)$$

3-е уравнение (5) более полно отображает характер нелинейности влияния электромагнитных взаимосвязей индуцированных в Ш-образном канале МДУ токов (с плотностью от 3 до 8 МА/м²) с магнитными полями электромагнита (0,05-0,3 Тл); может справедливо использоваться в качестве математической модели для расчёта электромагнитных сил в р.з. МДУ и для дальнейшего теоретического обоснования МГД-воздействий. Для случая практического применения в САУ на базе микропроцессорной техники приемлемо использовать 1-е и 2-е уравнения (5).

Анализ полученных выражений (5), с точки зрения оценки соотношения коэффициентов – $k1/k2$ (рис. 3), позволяет оценить роль и степень участия индуцирован-

ных в жидкометаллическом витке Ш-образного канала МДУ токов (I) к магнитному полю (B), а именно роль участия составляющей тока в индукции магнитного поля для создания электромагнитной силы в р. з. МДУ, которая составляет $-k_1/k_2 = [U_{инд}/U_{эм}] = 1/(3,7\div 3,5) = 0,27\div 2,29$. Соотношение коэффициентов нелинейности 2-го порядка $k_4/k_5 = [U_{инд}/U_{эм}] = 1,375/1$ характеризует снижение степени влияния величины напряжений питания индукторов при создании максимальных значений электромагнитных сил (до 30 кПа).

Для преобразования измеряемых с помощью ИВИС суммарных электромагнитных сил ($\Sigma F_{эм}(U_{инд}, U_{эм})$) в создаваемое в р. з. МДУ электромагнитное давление ($p_{эм}$) и для его сопоставления с напорными характеристиками, принимая во внимание то, что на создание собственно гидравлического напора в центральном трубопроводе Ш-образного канала МДУ за пределами р. з. МДУ действует лишь часть нормальной составляющей силы f , проецируемой на сечение выпускного патрубка тройниковой р. з. $-S_{пат.р.з.}$, а также то, что за пределами тройниковой р. з. (рис. 1) на расплав не действуют объёмные однонаправленные электромагнитные силы $F_{эм} = df_{з}/dV$ [1], произведём преобразования полученных закономерностей (3, 4 и 5) к виду: $h = f(p) \equiv f(f_{эм})$, м:

$$h(f_{эм}) = (f_{эм}/S_{пат.р.з.}) / (\rho \cdot g) = k \cdot f_{эм}, \quad (6)$$

где $k = 1/(S_{пат.р.з.} \cdot \rho \cdot g) \approx 0,0441\div 0,053 \text{ с}^2/\text{кг}$; ρ – плотность алюминиевого расплава, $\text{кг}/\text{м}^3$ (для расплава АК7 при температуре 700°C $\rho \approx 2450 \text{ кг}/\text{м}^3$); $f_{эм}$ – величина электромагнитной силы, Н; $S_{пат.р.з.}$ – площадь сечения выпускного патрубка тройниковой рабочей зоны МДУ, м^2 , ($S_{пат.р.з.} = (7,85\div 9,42) \cdot 10^{-4}$).

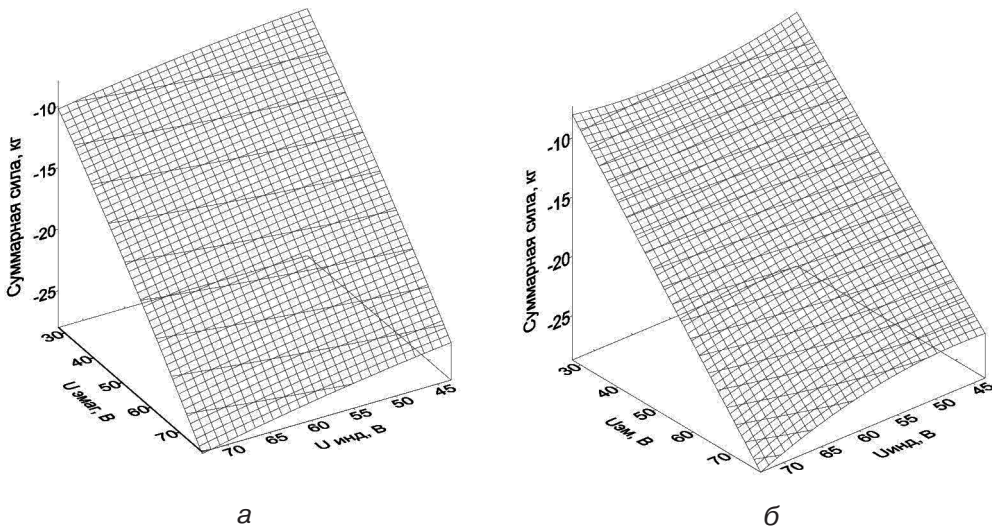


Рис. 3. Корреляционная модель $\Sigma F_{эм}(U_{инд}, U_{эм})$ (а – линейного типа (1-й тип), (5-1) и б – квадратичного полинома (2-й тип), (5-3)), создаваемая в МДУ суммарной электромагнитной силы (кг), от напряжения, подаваемого на обмотки индукторов ($U_{инд}$) и электромагнита ($U_{эм}$)

При создании максимального «паспортного» значения электромагнитного давления в МДУ ($p_{эм} = 30 \text{ кПа}$) в р. з. по выражению (6), возникает «эффективная» электромагнитная сила $f_{эм}^* = 23,55\div 31,84 \text{ Н}$, создающая пьезометрический напор столба алюминиевого расплава в металлопроводе выше уровня расплава в тигле $h = 23,55 \cdot 0,053 \approx 31,84 \cdot 0,0441 \approx 1,250 \text{ м}$.

Однако, сравнение величины эффективной электромагнитной силы $f_{эм}^*$ и измеренной с помощью ИВИС $\Sigma F_{эм}$ (рис. 2, 3) показало, что их величины отличаются на порядок (более чем в 10 раз) (например для $p_{эм} = 30 \text{ кПа}$, $-f_{эм}^*(23,55\div 31,84 \text{ Н}) \ll \ll \Sigma F_{эм} (284,5 \text{ Н})$), а сравнение «массовых эквивалентов» при этом составляет как $2,4\div 3,25$ к $29,5$, кг.

Для преобразования установленных экспериментально силовых закономерностей (3, 4, 5) к гидравлической «эффективной» электромагнитной силы, создающей гидравлическое давление в расплаве вне р. з. $f_{эм}^*$, представим её соотношение к $\Sigma F_{эм}$ с коэффициентом $k_{пот}$, характеризующим совокупные в р. з. потери (7), Н:

$$f_{эм}^* = k_{пот} \cdot \Sigma F_{эм} = ((23,55 \div 31,84) / 284,50) \cdot \Sigma F_{эм} = (0,0828 \div 0,112) \cdot \Sigma F_{эм}, \quad (7)$$

где $k_{пот}$ – коэффициент, учитывающий потери электромагнитных сил, действующих в р. з. МДУ при создании электромагнитного давления ($k_{пот} = 0,0828 \div 0,112$).

Таким образом, реально установленное значение эффективности (КПД) действия электромагнитных сил в тройниковой р. з. МДУ на создание гидравлического давления в системе рабочая зона МДУ-центральный трубопровод Ш-образного канала-металлопровод составляет от 8,2 до 11,2 %.

С учётом вышесказанного и (7) выражение (6) будет иметь вид, м:

$$\begin{aligned} h(\Sigma F_{эм}) &= k_{пот} \cdot \frac{\Sigma F_{эм} / S_{пот.р.з.}}{p \cdot g} = k_{пот} \cdot k \cdot \Sigma F_{эм} = \\ &= (0,00439 \div 0,004935) \cdot \Sigma F_{эм}. \end{aligned} \quad (8)$$

В данном случае, выражение (8) является закономерностью преобразования измеряемых с помощью ИВИС и создаваемых в р. з. МДУ объёмных электромагнитных сил к величине развиваемого в МДУ электромагнитного напора (давления), а математическая корреляционная модель зависимости напорных характеристик МДУ от напряжения питания индукторов и электромагнита с учётом (5) и (8) будет иметь вид (9), м:

$$h(U_{инд}, U_{эм}) = -0,00439 \div 0,00494 \cdot \begin{pmatrix} (-0,001093 U_{инд}^2 - 0,000794 U_{эм}^2 - \\ +0,065497 U_{инд} - 0,22967 U_{эм} - \\ -0,0006 U_{инд} U_{эм} - 0,950214 \end{pmatrix} \cdot g. \quad (9)$$

Проверка «адекватности» математической модели (15), её соответствия реальным экспериментальным зависимостям напорных характеристик (полученных по методике измерения реального перепада уровней металла в тигле МДУ и в металлопроводе [8]) в зависимости от напряжения питания электромагнита (от 35 до 75 В) и для 3-х значений напряжения, подаваемого на обмотки индукторов (44, 58 и 73 В), подтвердила соответствие математической модели (9) (рис. 4). Девияция математической модели напора в МДУ с учётом совокупной погрешности экспериментальных измерений напряжения и напорных характеристик $\pm 2,5$ -3 % составила не более ± 7 % ($R = 0,9$).

Однако в результате проверки адекватности (рис. 4) **произведение коэффициентов потерь** и преобразования проецирования электромагнитных сил на выпускной патрубков тройниковой р. з. ($k_{пот} \cdot k = 0,00439 \div 0,004935$) показал некоторое несоответствие к реальным напорным характеристикам, установленным экспериментальным путем при варьировании напряжения, подаваемого на индукторы МДУ. Обоснование причин нелинейности может заключаться в особенностях процессов перераспределения плотности тока в проекции тройниковой рабочей зоны, а также наличия МГД-явлений, имеющих место в ней (рис. 5) [10].

Реальный коэффициент потерь ($k_{пот}$) для выражения (9) оказался несколько выше предполагаемого диапазона вариации (рис. 5, 1, 2). Фактическая зависимость коэффициента $K^* = k_{пот} \cdot k \cdot f(U_{инд})$ при этом имеет нелинейный характер (рис. 5, 3), и может быть представлена в виде полинома 2-й степени как функция от напряжения, подаваемого на индукторы МДУ:

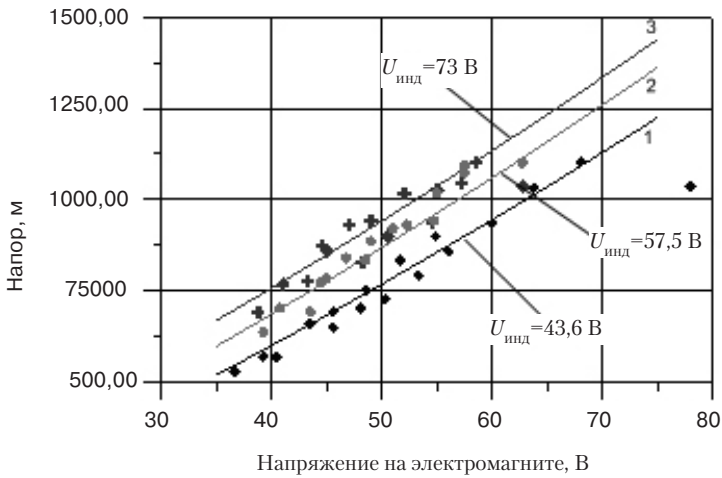


Рис. 4. Сравнение расчётных и экспериментальных значений напорных характеристик МДУ (адекватность математической модели)

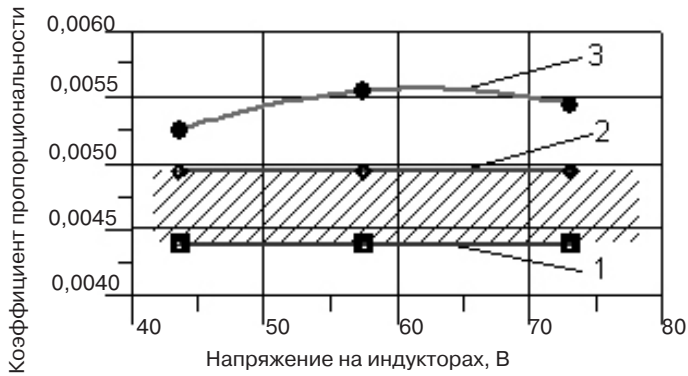


Рис. 5. Нелинейность зависимости коэффициента пропорциональности (потерь) от напряжения, подаваемого на обмотки индукторов. (1, 2 – нижний и верхний интервалы вариации коэффициента пропорциональности, 3 – фактический)

$$K^* = k_{\text{пот}} \cdot k \cdot f(U_{\text{инд}}) = -9,54 \cdot 10^{-7} \cdot U_{\text{инд}}^2 + 0,000118 \cdot U_{\text{инд}} + 0,00191. \quad (10)$$

В этом случае, выражения (8) и (9) имеют вид, м:

$$h(\Sigma F_{\text{эм}}) = K^* \Sigma F_{\text{эм}} = (0,00525 \div 0,0055) \cdot F_{\text{эм}}, \quad (11)$$

$$h^*(U_{\text{инд}}, U_{\text{эм}}) = (0,00525 \div 0,0055) \times (-9,54 \cdot 10^{-7} \cdot U_{\text{инд}}^2 + 0,000118 \cdot U_{\text{инд}} + 0,00191) \times \begin{pmatrix} -0,001093 \cdot U_{\text{инд}}^2 - 0,000794 \cdot U_{\text{эм}}^2 - \\ +0,065497 \cdot U_{\text{инд}} - 0,22967 \cdot U_{\text{эм}} - \\ -0,0006 \cdot U_{\text{инд}} \cdot U_{\text{эм}} - 0,950214 \end{pmatrix} \cdot g. \quad (12)$$

Следующим этапом комплексных многофакторных исследований в МВУ для алюминиевых сплавов является изучение, систематизация и обоснование закономерностей силовых электромагнитных взаимодействий жидкометаллического витка с током, с конструкцией тигля и канала МДУ – $F_{\text{реак.констр.}}$ при протекании в нём токов повышенной плотности, создаваемых в р. з. электромагнитных сил – $F_{\text{эм.сил.}}$, а также сил, возникающих в результате взаимодействия индукторов с жидкометаллическим витком в сдвоенном Ш-образном канале $F_{\text{рад.сил.}}$, силового эквивалента взаимодействия переменного электрического тока на горизонтальном участке Ш-образного канала МДУ в окрестности р. з. с магнитопроводом электромагнита $F_{\text{эм.взаимод.}}$ при реализации технологических режимов «хранения» и «бокового перемешивания», применяемых в технологиях электрофизической обработки алюминиевых расплавов.

Совокупность реализованных в настоящей работе подходов, исследований, контроля и управления технологическими и эксплуатационными характеристиками работы МДУ позволяет в дальнейшем разработать ряд специальных, высокоточных способов исследования рабочих и физических свойств и характеристик расплава в процессе его комплексной электрофизической обработки (второе и третье сообщения) путём прямого, непрерывного и в реальном масштабе времени многофакторного измерения параметров токовой составляющей в жидкометаллическом витке и его температуры. Многофакторная полномасштабная систематизация электромагнитных взаимосвязей в МДУ позволит, наряду с оптимизацией технологических процессов обработки и литья алюминиевых сплавов, создать высокоточные адекватные компьютерные модели МДУ и на их основе разработать концептуальные подходы совершенствования существующих и создания МГД-оборудования нового поколения.

Выводы

- С целью систематизации и более глубокого понимания закономерностей электромагнитных силовых взаимодействий в МДУ для алюминиевых сплавов разработана оригинальная методика прямого измерения в реальном масштабе времени нормальных составляющих силовых эквивалентов электромагнитного взаимодействия электрических токов в жидкометаллическом витке и внешних электромагнитных полей, создаваемых внешним электромагнитом с собственными электромагнитными системами таких установок по принципу пондеромоторных связей.

- В результате экспериментальных исследований впервые установлены и приведены к виду трёхмерной (3D) двухфакторной математической модели (адекватной для использования в САУ и создания компьютерной модели управления электромагнитными системами МДУ в режиме электромагнитной разливки). Получены зависимости создания электромагнитных сил в тройниковой р. з. МДН-6А от параметров питания индукторов и электромагнита, а также проведено их преобразование в создаваемое на выходе из р. з. гидравлическое давление. Проведена аналитическая и экспериментальная проверка адекватности установленных корреляционных моделей.

- Аналитическая оценка степени участия создаваемых в р.з. МДУ реальных значений нормальной составляющей объёмных электромагнитных сил и их преобразования в напор (давление) на выходе из р. з. показала, что реально установленное значение эффективности (КПД) тройниковой р. з., с точки зрения создания гидравлического давления в системе рабочая зона МДУ-центральный трубопровод Ш-образного канала-металлопровод составляет от 8,2 до 11,2 %, что является следствием сугубо низкого уровня соответствия геометрии р. з. МДН-6А и распределения объёмных электромагнитных сил в ней, в том числе и процессов распределения плотности тока, индукции магнитного поля и наличия влияния МГД-явлений, их взаимодействия в межполюсном зазоре С-образного электромагнита.

- В результате опытно-промышленной проверки функциональных возможностей МВУ с интегрированной весоизмерительной системой была установлена возможность высокоточной регистрации и контроля в реальном масштабе времени, наряду

с векторной суммой действующих значений нормальных составляющих электромагнитных сил, создаваемых в р. з. МДУ, силовых эквивалентов электромагнитного взаимодействия магнитного поля электромагнита В с металлоконструкцией Ш-образного канала в окрестности полюсов электромагнита, переменного электрического тока I на горизонтальном участке Ш-образного канала в окрестности р. з. МДУ с С-образным магнитопроводом электромагнита, а также радиальных сил, обусловленных взаимодействием тангенциальной составляющей тока I в канале и магнитного поля индукторов.



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. Современные устройства для электромагнитного перемешивания алюминиевых расплавов в печах и миксерах повышенной емкости / В. И. Дубоделов, В. Н. Фикссен, М. С. Горюк, Н. А. Слажнев, Ю. П. Скоробагатько // *Металл и литье Украины*. – 2008. – № 6. – С. 12-17.
3. Патент України на винахід № 100399. Спосіб і пристрій для рафінування розплавлених металів і сплавів / МПК (2012.01), C22B 9/05, C22B 21/00, C21C 7/072 // Фікссен В. М., В. І. Дубоделов, М. А. Слажнев (ФТІМС НАН України). – Заявл. 13.07.2010 р. № а 2010 08730. – Опубл. 25.12.2012, Бюл. № 24. – 8 с. іл.
4. *Jung-Moo Lee, Hyun-Suk Sim, V. Dubodelov, V. Fikssen and M. Slazhniev. In-line Degassing Treatment of A356 Alloy using the Electromagnetic Melt Transferring Pump // Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys, September 5-9, 2010, Yokohama, Japan. – P. 1714-1719.*
5. *Слажнев Н. А. Магнитовесовая установка с микропроцессорным контролем и управлением дозированной разливкой алюминиевых расплавов / Н. А. Слажнев, В. И. Дубоделов, К. С. Богдан // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2012. – № 1 (27) – С. 36-41.*
6. *Слажнев Н. А. Исследование динамических процессов при дозированной разливке алюминиевых расплавов из магнитовесовой литейной установки / Н. А. Слажнев, В. И. Дубоделов, К. С. Богдан // *Процессы литья*. – 2011. – № 4. – С. 34-40.*
7. *Слажнев Н. А. Система коррекции расходных характеристик магнитовесовой установки при переменном уровне расплава в тигле // *Металл и литье Украины*. – 2011. – № 8. – С. 34-40.*
8. Патент України № 66908 на корисну модель. Магнітовагова ливарна установка / Слажнев М. А., Дубоделов В. І., Богдан К. С., Санкін А. О. МПК (2011.01) B22D 13/00, G01G 19/12 (2006.01). – Опубл. 25.01.2012; Бюл. № 2.
9. Патент України № 68766 на корисну модель. Установка для лиття під низьким електромагнітним тиском / Слажнев М. А., Богдан К. С., Дубоделов В. І., Моїсєєв Ю. В., Фікссен В. М.; МПК B22D 18/04, G01G 19/12. – Опубл. 10.04.2012. – Бюл. № 7.
10. Дубоделов В.И. Влияние магнитогидродинамических процессов в рабочей зоне магнитодинамических установок на их эксплуатационные характеристики / В. И. Дубоделов, Ю. В. Моисеев, Н. А. Слажнев, К. С. Богдан, Н. А. Кудрявченко, В. К. Погорский, А. О. Горшков // *Процессы литья*. – 2013. – № 3. – С. 64-73.
11. Авт. свид. 1138238A SU. Способ регулирования давления при литье под низким электромагнитным давлением / Фикссен В.Н., Полищук В.П., Моисеев Ю.В., Пужайло Л.П., Пржемыский С.К. B22D, 17/32, опубл. 7.02.1985, Бюл. № 5.
12. Патент України № 54799 на корисну модель. Магнітоваговий дозатор дискретної дії для металевих розплавів / Богдан К. С., Дубоделов В. І., Моїсєєв Ю. В., Слажнев М. А., Санкін А. О., Фікссен В. М. МПК (2009) B22D 13/00, G01G 19/00 (2010.05), опубл. 25.11.2010. – Бюл. № 22, 2010 р.

Поступила 14.04.2015