

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

На правах рукописи

КУЧАЕВ Александр Андреевич

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РАСПЛАВА
В ПРОЦЕССЕ РАФИНИРОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
В ИНДУКЦИОННОЙ КАНАЛЬНОЙ ПЕЧИ

Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и
системы, включая их управление
и регулирование

Специальность 05.16.04 - Литейное производство

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

КИЕВ-1994

Работа выполнена в Институте проблем литья НАН Украины

- Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор А. Ф. КОЛЕСНИЧЕНКО
- Официальные оппоненты - доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник
В. Н. ИСАКОВ
- кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
В. С. ЯКОВЛЕВ
- Ведущая организация - НПО "Киевский институт
автоматики"

Защита состоится "14" июля 1994 г. в 14 час. на заседании специализированного совета К. 016.63.01 Института проблем энергосбережения НАН Украины (252070, г. Киев-70, ул. Покровская, 11).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института проблем энергосбережения НАН Украины.

Автореферат разослан "11" июля 1994 г.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00756521 (Q)

Н. В. РАПЦУН

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. В настоящее время МГД привод как составная часть электропривода широко используется в промышленности в качестве МГД насосов, МГД сепараторов, МГД грануляторов, устройств перемешивания и транспортировки жидких металлов. В цветной металлургии наиболее эффективным автоматизированным электротехническим комплексом для приготовления алюминиевых сплавов является индукционная канальная печь (ИКП) с отъемными индукционными единицами (ИЕ), в которых происходит преобразование электромагнитной энергии в тепловую.

Высокие требования, предъявляемые к чистоте алюминиевых сплавов по газосодержанию и оксидным включениям вызывают наряду с совершенствованием известных методов рафинирования жидких металлов разработки прогрессивных, экологически чистых материало- и энергосберегающих технологических процессов и эффективного электрооборудования для их реализации. Кроме того, при выплавке алюминиевых сплавов в ИКП существует проблема зарастания каналов ИЕ твердыми неметаллическими включениями, что существенно снижает технико-экономические показатели печей.

К числу наиболее перспективных электромагнитных методов управления вращающимся потоком жидкого металла с целью его очистки, уменьшения интенсивности зарастания футеровки каналов МГД приводов, улучшения тепломассопереноса относятся способы, основанные на взаимодействии собственного и дополнительного электромагнитных полей с электропроводной средой, позволяющие создавать вращательное движение металла в каналах ИЕ промышленных печей и электромагнитных устройствах (ЗУ) МГД рафинирования.

Таким образом, существенный научный и практический интерес представляет разработка и исследование электромагнитных систем управления вращательным движением жидкометаллического ротора в индукционных системах для осуществления процесса рафинирования алюминиевых сплавов.

Исследования по диссертационной работе выполнялись в соответствии с научно-исследовательскими темами "Ранг" - "Разработать новые энерго- и материалосберегающие технологии силового и термического воздействия на металлы с помощью электромагнитного поля, создать электротехнические средства для их реализации" (Постановление

ГКНТ СССР N 111 от 21.03.1985 г.) и "Разработать средства автоматизации для специальных способов литья, методы контроля режимов индукционной плавки и микропроцессорную систему автоматического управления заливкой литейных форм" (Постановление Президиума АН УССР N 57 от 11.02.87 г.).

Целью работы является исследование электротехнического комплекса рафинирования алюминиевых сплавов на базе МГД привода с цилиндрическим каналом ИЕ индукционной печи и разработка на этой основе способов электромагнитного управления скоростью вращения жидкометаллического ротора, обеспечивающих повышение качества рафинируемого металла.

Поставленная цель потребовала решения следующих задач:

- разработки принципов построения и практической реализации системы управления движением расплава алюминия в ЗУ с цилиндрическим каналом промышленной печи ИАК-25;
- построения математической модели электромагнитных процессов в цилиндрическом канале ИЕ как электроприводе с непосредственным преобразованием электромагнитной энергии;
- экспериментального исследования электромеханических характеристик в ЗУ с каналом, неохваченным магнитопроводом;
- построения регрессионной модели, описывающей зависимость угловой скорости движения расплава в канале от параметров МГД привода;
- исследования управляемого движения электропроводной жидкости для осуществления МГД сепарации алюминиевых сплавов;
- разработки комбинированных способов рафинирования алюминиевых сплавов;

Методы исследования. Для решения сформулированных задач были использованы основные положения теории электромагнитного поля, классические методы расчета магнитных полей в электроприводах, элементы теории и методы планирования полнофакторного эксперимента, а также методы регрессионного анализа. Достоверность основных научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена экспериментальными данными, полученными в лабораторных и промышленных условиях.

Научная новизна. Решена задача расчета электромагнитного поля применительно к МГД приводу с цилиндрическим каналом ИЕ, неохваченным магнитопроводом при наличии индукционной катушки седлообразной формы. Определены электродинамические усилия в жидкометал-

лическом роторе МГД привода, созданные под действием вращающегося магнитного поля. Рассчитаны скорости вращения жидкого алюминия в канале электропривода, необходимые для управления процессом рафинирования металла; разработана система измерений и впервые установлены экспериментальным путем угловые скорости вращения жидкометаллического ротора индукционной установки, при которых достигается МГД очистка алюминиевых сплавов; разработана электромагнитная система управления движением расплавленного металла и определены способы регулирования угловой скорости ротора МГД привода; предложены принципы осуществления комбинированных способов рафинирования алюминиевых сплавов, сочетающих: вращательное движение металла с подачей в жидкометаллический ротор инертного газа; вращение ротора МГД привода с введением в него рафинирующего флюса.

Практическая ценность. Результаты диссертационной работы использованы при создании электроприводов с непосредственным преобразованием электромагнитной энергии во вращательное движение жидкометаллического ротора, обеспечивающих регулируемый индукционный нагрев жидких алюминиевых сплавов, снижающих зарастание стенок цилиндрических каналов твердыми неметаллическими включениями. Использование новых научных положений, обоснованных в работе, позволило разработать способ рафинирования и МГД устройство, в котором вращение верхней и нижней частей жидкометаллического ротора осуществляется в противоположных направлениях с различными скоростями, что позволяет уменьшить содержание водорода и повысить механические свойства рафинируемых алюминиевых сплавов.

Автор выносит на защиту:

- результаты теоретических исследований электромагнитного поля МГД привода с магнитной системой, создающей вращательное движение жидкого металла;
- результаты экспериментальных исследований поля угловых скоростей жидкометаллического ротора ЭУ;
- результаты моделирования электромеханических характеристик МГД привода;
- результаты исследований асинхронного регулируемого МГД привода, обеспечивающего осуществление технологического процесса рафинирования жидкого алюминия;
- разработку комбинированных способов рафинирования алюминиевых сплавов.

Внедрение результатов работы. Научные результаты и рекомендации диссертационной работы положены в основу разработок, выполненных при участии автора в 1986-1993 гг. Разработанные методы расчета электромагнитных параметров МГД приводов, технические решения систем измерения и управления вращением жидкометаллического ротора электропривода, результаты экспериментальных исследований электро-механических характеристик использованы при модернизации печей ИАК - 25/2,1 и разработке электротехнических систем МГД сепарации алюминиевых сплавов на Красноярском металлургическом заводе, НПО "ТЕМП" (г. Москва).

Апробация работы. Материалы диссертации обсуждались и публиковались на Всесоюзной научно-технической конференции "Математическое моделирование в энергетике" (г. Киев, 1990), Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы энергосбережения" (г. Киев, октябрь 1991 г.), Международном симпозиуме по МГД технике жидких металлов (г. Рига, 1988 г.), Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы измерительной техники в волоконной оптике" (г. Нижний Новгород, 1991 г.), Всесоюзном научно-техническом семинаре "Применение оптоволоконной техники в информационных системах" (г. Ленинград, 1991 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 28 печатных работ, в том числе 23 статьи и 5 изобретений.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 125 страницах машинописного текста, иллюстрирована 61 рисунком и 40 таблицами, список литературы содержит 177 наименований, имеется 4 страницы приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении излагаются актуальность и новизна темы диссертационной работы, сформулированы цели, задачи и положения вносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу электромагнитных ситуаций, создающих вращательное движение расплава в электрических комплексах для плавки металлов и разработке электропривода с регулируемой скоростью жидкометаллического ротора. Рассмотрено регулирование координат ИЕ печи, в канальной части которой протекает ток

плотностью δ_0 , индуцированный магнитным полем Φ_0 индуктора и седлообразной катушки с током δ_k , создающим магнитное поле Φ_k (рис. 1), а также в ЗУ как электроприводе с каналом ИЕ печи ИАК-25. Основным элементом разработанного электропривода является регулируемая асинхронная машина с цилиндрическим каналом 1, заполненным жидким металлом 2, в котором осуществляется МГД рафинирование алюминиевых сплавов. Статор ЗУ состоит из секционированной обмотки индуктора 3 с магнитопроводом 4 и седлообразной катушки 5 (рис. 2).

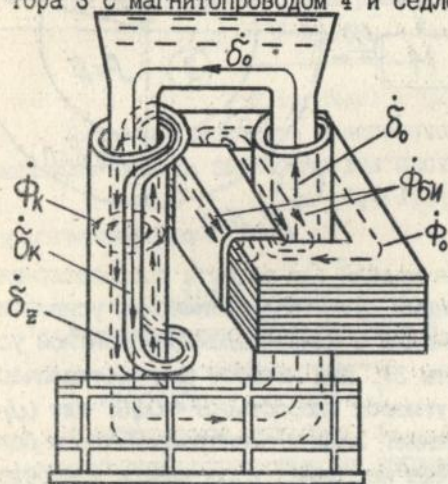


Рис. 1

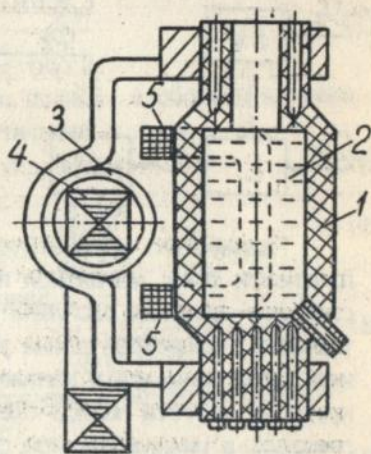


Рис. 2

Вращение жидкометаллического ротора ЗУ осуществляется вращающимся магнитным полем, созданным магнитным полем рассеяния Φ_{Σ} индуктора и магнитным полем Φ_k седлообразной катушки, которые сдвинуты относительно друг друга в пространстве и по фазе на 90° . Вращающееся поле наводит ток δ_z в роторе МГД привода. В представленном электроприводе разомкнутая система регулирования позволяет управлять координатой ω жидкометаллического ротора М установки изменением величины тока седлообразной катушки LM1 и его фазового сдвига по отношению к магнитному потоку рассеяния Φ_{Σ} индуктора LM с помощью напряжения управления $U_{\text{ук}}$ (рис. 3). Дискретное регулирование скорости ЗУ осуществляется управляющим напряжением $U_{\text{уп}}$ ступенчатым изменением числа витков индуктора контактным переключателем S и, следовательно, изменением величины вторичного тока, протекающего по каналу ЕК с жидким металлом. Схема содержит, также, трансформатор TV и регулируемый дроссель L, предназначен-

ный для плавного регулирования тока в седлообразной катушке и магнитного потока Φ_k . Основным достоинством данной системы регулирования скорости электропривода является простота эксплуатации.

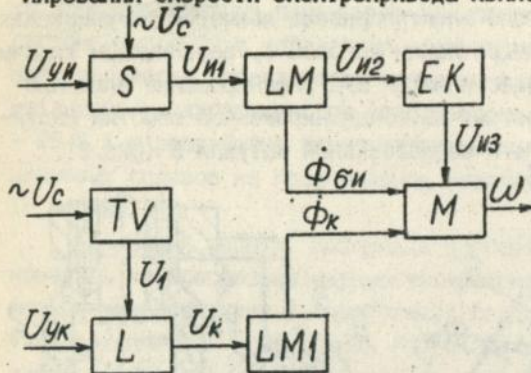


Рис. 3

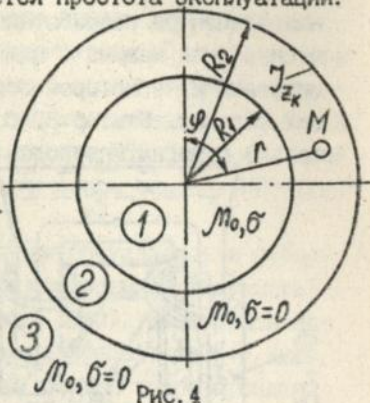


Рис. 4

Разработана математическая модель для расчета распределения плотности тока, магнитной индукции, электродинамических усилий и скорости вращения расплава алюминия в канале электромагнитной установки. Рассмотрен режим работы ЗУ, при котором жидкометаллический ротор вращался в канале с угловой скоростью $\omega = \omega_1 S$, где ω_1 - круговая частота поля, S - скольжение. Задача электромагнитного поля решалась в цилиндрической системе координат и сводилась к определению Z - составляющей напряженности электрического поля \dot{E}_1 , которая описывается дифференциальным уравнением в области 1 (рис. 4)

$$\frac{d^2 \dot{E}_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\dot{E}_1}{dr} - (j \mu_0 \sigma \omega + \frac{P_k^2}{r^2}) \dot{E}_1 = 0 \quad (1)$$

и в областях 2, 3

$$\frac{d^2 \dot{E}_{2,3}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\dot{E}_{2,3}}{dr} - \frac{P_k^2}{r^2} \dot{E}_{2,3} = 0, \quad (2)$$

где r - радиус канала, μ_0 - магнитная проницаемость воздуха, σ - удельная электропроводность, P_k - число пар полюсов, k - номер гармоники.

Уравнения (1), (2) решены совместно с граничными условиями:

$$\begin{aligned} \text{При } r = R_1, \quad \dot{E}_1 &= \dot{E}_2, & \frac{d\dot{E}_1}{dr} &= \frac{d\dot{E}_2}{dr} \\ \text{При } r = R_2, \quad \dot{E}_2 &= \dot{E}_3, & \frac{d\dot{E}_2}{dr} - \frac{d\dot{E}_3}{dr} &= j \mu_0 \omega_1 J_{zk} \end{aligned} \quad (3)$$

где J_{z_k} - Z составляющая линейной плотности тока статорной обмотки.
Решение системы уравнений ищем в виде:

$$\dot{E}_1 = C_1 I_{p_k}(\gamma), \quad \dot{E}_2 = C_2 \gamma^{p_k} + C_3 \gamma^{-p_k}, \quad \dot{E}_3 = C_4 \gamma^{-p_k}, \quad (4)$$

где $\gamma = \sqrt{-j \mu_0 \sigma \omega}$, $C_1 \dots C_4$ - постоянные интегрирования,
 I_{p_k} - модифицированная функция Бесселя I-го рода порядка p_k .

После решения системы уравнений (4) получим:

$$C_1 = \frac{j \mu_0 \omega R_2 (R_1 / R_2)^{p_k} J_{z_k}}{p_k I_{p_k}(R_1 \gamma) + R_1 \gamma I'_{p_k}(R_1 \gamma)}. \quad (5)$$

Зная напряженность электрического поля \dot{E}_1 в области жидкого металла запишем выражение для плотности тока:

$$\delta_z = C_1 \sigma I_{p_k}(\gamma) \quad (6)$$

и магнитного поля

$$\dot{B}_r = -\frac{p_k}{r \omega} \dot{E}_1, \quad \dot{B}_y = \frac{p_k}{\omega} \dot{E}_1 \quad (7)$$

Максимальные значения δ_z и \dot{B}_r равны:

$$\delta_m = \sqrt{2} \sigma \sqrt{(\operatorname{Re} \dot{E}_1)^2 + (\operatorname{Im} \dot{E}_1)^2}, \quad B_m = -\frac{p_k}{r \omega} \sqrt{(\operatorname{Re} \dot{E}_1)^2 + (\operatorname{Im} \dot{E}_1)^2} \quad (8)$$

Максимальное значение $f_{m\varphi}$ составляющей объемной электромагнитной силы определяем из выражения:

$$f_{\varphi} = \delta_z \cdot B_r = \frac{\delta_m B_m}{2} \{1 - \cos[2(\omega t - p_k \varphi)]\} \quad (9)$$

$$f_{m\varphi} = \frac{\delta_m B_m}{2} \quad (10)$$

Результаты расчета показывают, что максимальное значение силы f_{φ} наблюдается на поверхности расплава алюминия при относительном радиусе канала $r=1$ и по мере уменьшения r величина f_{φ} убывает из-за затухания вихревых токов при распределении электромагнитного поля по радиусу канала к оси жидкометаллического ротора МГД привода.

После определения электродинамических усилий f_{φ} рассчитана скорость вращения ротора из жидкого алюминия в канале электропривода с помощью расчетной модели, основанной на определении баланса сил, действующих на расплавленный металл. Сравнительный анализ результатов расчета угловых и тангенциальных скоростей жидкого алюминия по радиусу канала с данными эксперимента показывает, что по-

грешность составляет не более 22% и является удовлетворительной для практических расчетов характеристик МГД приводов.

Во второй главе рассмотрена разработанная цифровая система измерения скорости жидкометаллического ротора ЭУ, обеспечивающая высокую точность измерения. Система измерения состоит из датчика-вертушки, фотозлектрического преобразователя, устройства согласования и электронного частотомера. В результате экспериментальных исследований получены электромеханические характеристики, описывающие зависимости угловой скорости ω жидкометаллического ротора индуктора $I_{и\omegaи}$ и седлообразной катушки $I_{к\omegaк}$.

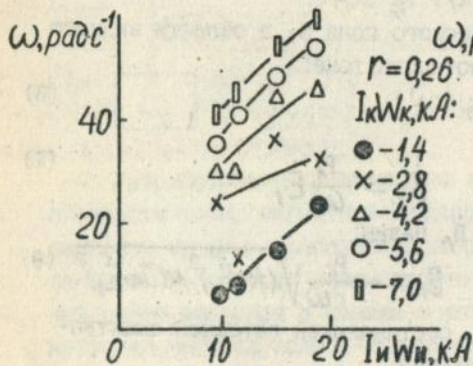


Рис. 5

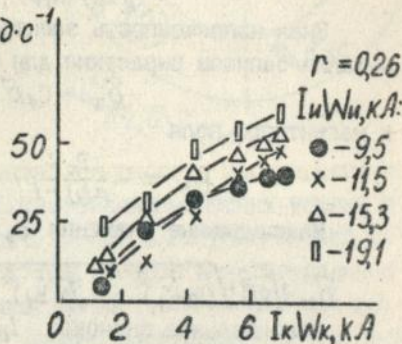


Рис. 6

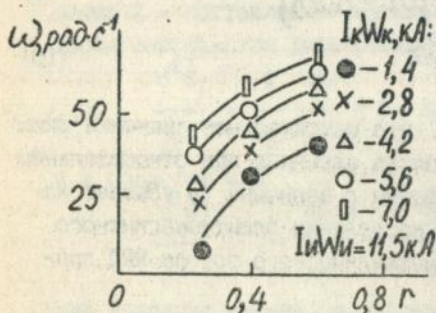


Рис. 7

Показано, что зависимости скорости $\omega = f(I_{и\omegaи})$, $\omega = f(I_{к\omegaк})$ близки к линейным (рис. 5, 6). Экспериментально установлено, что распределение скорости ω по радиусу жидкометаллического ротора носит нелинейный характер и увеличивается по мере приближения к стенке канала (рис. 7). Показано, что вращение ротора из жидкого алюминия в канале МГД привода отличается от вращения твердого тела.

Определены основные показатели регулирования угловой скорости жидкометаллического ротора ЭУ. К ним следует отнести диапазон регулирования угловой скорости, максимальное значение которого составляет $D = 13:1$. Плавность регулирования скорости ЭУ принимает значение $K_{пл} = 2,4$. Коэффициент

мощности $\cos \varphi = 0,27 \dots 0,3$ значительно меньше, чем у большинства асинхронных двигателей. Это отличие является следствием больших немагнитных зазоров между статорной и роторной обмотками ЗУ.

В третьей главе, используя метод регрессионного анализа исследуются зависимости угловой скорости жидкометаллического ротора от параметров МГД привода. Для построения регрессионной модели распределения поля скоростей использованы данные полного факторного эксперимента (ПФЭ) о влиянии ампер-витков индуктора $I_{иВи}$, ампер-витков седлообразной катушки $I_{кВк}$ и радиусов r , где производились измерения скорости, на распределение скорости ω вращения металла в расчетных областях жидкометаллического ротора.

Исследуемый объект описывается моделью вида:

$$\omega = f(r, I_{иВи}, I_{кВк}), \quad (11)$$

которая устанавливает связь выходного параметра ω и факторов r , $I_{иВи}$, $I_{кВк}$ технологического процесса рафинирования металлического расплава. Использование результатов ПФЭ позволяет представить модель (11) уравнением:

$$\hat{\omega} = b_0 + b_1 r + b_2 I_{иВи} + b_3 I_{кВк} + b_4 r I_{иВи} + b_5 r I_{кВк} + b_6 I_{иВи} I_{кВк} + b_7 r I_{иВи} I_{кВк}, \quad (12)$$

где $\hat{\omega}$ - оценка математического ожидания угловой скорости движения металла в цилиндрическом канале; $b_0 \dots b_7$ - идентифицируемые коэффициенты входных параметров МГД привода.

При рассмотрении расчетной модели с учетом значимых коэффициентов $b_0 \dots b_5$ получено уравнение регрессии в виде:

$$\hat{\omega} = 48,14 + 14,91r + 8,19I_{иВи} + 15,69I_{кВк} - 0,74rI_{иВи} - 2,39rI_{кВк} \quad (13)$$

Анализ уравнения (13) показывает неадекватность расчетной модели во внутренних точках факторного пространства опытным данным, поэтому интервал варьирования факторов разбивается на два подинтервала: $0,26 \dots 0,4$ и $0,4 \dots 0,62$ для фактора r ; $1,4 \dots 4,2$ и $4,2 \dots 7,0$ кА - для фактора $I_{кВк}$.

Закон изменения параметра ω в интервалах варьирования факторов эксперимента описывается вновь полученными уравнениями регрессии:

$$\begin{aligned} r &= 0,26 \dots 0,4; I_{иВи} = 9,5 \dots 19,1 \text{ кА}; I_{кВк} = 1,4 \dots 4,2 \text{ кА}, \\ \hat{\omega} &= 36,98 + 10,27r + 7,76I_{иВи} + 9,53I_{кВк} - 2,07rI_{кВк} - \\ &\quad - 0,64I_{иВи}I_{кВк}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} r &= 0,26 \dots 0,4; I_{иВи} = 9,5 \dots 19,1 \text{ кА}; I_{кВк} = 4,2 \dots 7,0 \text{ кА}, \\ \hat{\omega} &= 51,87 + 7,06r + 7,53I_{иВи} + 5,47I_{кВк} - 0,79rI_{иВи} - \end{aligned}$$

$$- 1,04гIк\mathbb{W}к - 0,49г Iи\mathbb{W}иIк\mathbb{W}к, \quad (15)$$

$$г = 0,4...0,62; Iи\mathbb{W}и = 9,5...19,1 \text{ кА}; Iк\mathbb{W}к = 1,4...4,2 \text{ кА},$$

$$\hat{\omega} = 55,25 + 8,01г + 4,26Iи\mathbb{W}и + 5,4Iк\mathbb{W}к - 3,12гIи\mathbb{W}и - \\ - 2,05гIк\mathbb{W}к + 1,34Iи\mathbb{W}иIк\mathbb{W}к + 2,01гIи\mathbb{W}иIк\mathbb{W}к, \quad (16)$$

$$г = 0,4...0,62; Iи\mathbb{W}и = 9,5...19,1 \text{ кА}; Iк\mathbb{W}к = 4,2...7,0 \text{ кА},$$

$$\hat{\omega} = 65,26 + 6,22г + 6,17Iи\mathbb{W}и + 4,6Iк\mathbb{W}к - 0,46гIи\mathbb{W}и + \\ + 0,57Iи\mathbb{W}иIк\mathbb{W}к + 0,65гIи\mathbb{W}иIк\mathbb{W}к \quad (17)$$

Проверка, выполненная с помощью критерия Фишера, показала, что линейные модели, соответствующие уравнениям (14) - (17) адекватны данным, полученным в результате экспериментов.

Показано, что с помощью данных уравнений регрессии можно прогнозировать скорость ω движения жидкого металла в цилиндрическом канале МГД привода в зависимости от факторов $г$, $Iи\mathbb{W}и$, $Iк\mathbb{W}к$ и, следовательно, решать задачу повышения прочностных характеристик и пластических свойств рафинируемых алюминиевых сплавов.

Для определения влияния каждого фактора на величину выходной переменной ω получены коэффициенты влияния (чувствительности) из выражения $A = b / \delta_i$, где b - коэффициент регрессии, δ_i - интервал варьирования факторов.

Установлено, что наибольшее влияние на скорость вращения металла оказывает величина радиуса канала $г$, а наименьшее - величина ампер-витков индуктора $Iи\mathbb{W}и$.

Определено, что величина ампер-витков седлообразной катушки $Iк\mathbb{W}к$ оказывает в 3 раза большее влияние на скорость ω , чем величина ампер-витков индуктора $Iи\mathbb{W}и$.

В четвертой главе рассмотрен новый МГД привод с улучшенными динамическими и энергетическими показателями, выполненный на базе ЗУ и системы измерения скорости (рис. 8). Замкнутая САУ, состоящая из датчика-вертушки BV, фотоэлектрического преобразователя VE, устройства согласования UZ, частотомера PF, устройства сравнения, представляющего собой частотный компаратор, цифрового задатчика DS, преобразователя код-напряжение и усилителя мощности U1, двигателя M1, перемещающего сердечник регулируемого дросселя L, изменяющего величину магнитного потока Φ_k седлообразной катушки LM1 и, следовательно, скорость жидкометаллического ротора ЗУ обеспечивает необходимую для процесса рафинирования точность стабилизации ω с помощью обратной связи по скорости. Задание скорости ω осуществляется задатчиком DS в виде сигнала заданной частоты $f_{оп}$.

Использование ТРН для реализации регулирования тока в канале позволяет улучшить энергетические показатели ($\cos \varphi$) управляемого МГД привода.

На основе экспериментальных исследований в жидкометаллическом роторе МГД привода получены шаровидные конгломераты, состоящие из газовых и оксидных включений, что позволяет судить об эффективности управления вращательным движением расплава алюминия для осуществления процесса рафинирования жидкого металла. Следует отметить, что в процессе длительной эксплуатации ЭУ не обнаружено интенсивного осаждения на стенках цилиндрических каналов твердых неметаллических включений (рис. 9).



Рис. 9

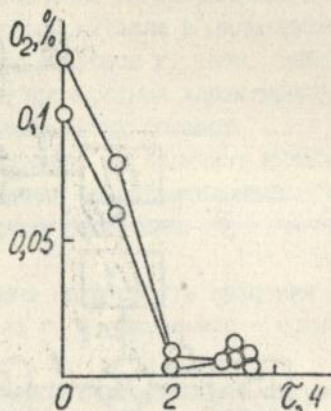


Рис. 10

Определены экспериментальные зависимости содержания кислорода в сплаве Al-Zn от времени рафинирования при значениях ампер-витков индуктора $I_{иВн} = 11,5$ кА и седлообразной катушки $I_{кВк} = 5,6$ кА, при этом скорость ротора МГД привода составляла $52 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$, а температура сплава $T = 1020 \pm 10 \text{ К}$. Исследование содержания кислорода в образцах сплава до и после рафинирования проводилось в ВИЛС нейтронно-активационным методом.

Опытные данные показывают, что содержание O_2 после 60 мин работы ЭУ снижается почти в 2 раза по сравнению с исходными данными, а после 120 мин - уменьшается более, чем на порядок, что свидетельствует о эффективности МГД очистки алюминиевых сплавов от оксидных включений.

Пятая глава посвящена вопросам разработки и практического использования электротехнического комплекса на базе МГД привода для исследования способов и устройств МГД очистки алюминиевых

сплавов. Комплекс состоит из ЗУ рафинирования, системы регулировки скорости и температуры жидкого алюминия, системы измерения температуры элементов конструкций электротехнического комплекса, электрической плавильной печи, устройства ввода инертного газа в расплавленный алюминий, системы охлаждения ЗУ.

Приведены зависимости степени дегазации, содержания водорода, прочности на разрыв $\tilde{\sigma}_B$ и относительного удлинения $\tilde{\delta}$ алюминия и его сплавов А7, АЛ2, АЛ9, АК7, АК5М2 и АМГ-6 от времени рафинирования в ЗУ электротехнического комплекса. Содержание водорода в сплавах определено методом плавления образцов в потоке инертной среды: на газоанализаторе RH-1E фирмы "Леко" (США) с датчиком теплопроводности. Для получения достоверных результатов использованы данные анализов 3-5 образцов, соответствующих требованиям ГОСТ 21132.1-81 при трехкратном контроле в течение смены надежности работы прибора для определения газообразного водорода и по эталонным образцам, разработанным ВИЛС. Изготовление и испытание образцов для определения механических свойств алюминиевых сплавов проведено согласно ГОСТ 1497-84.

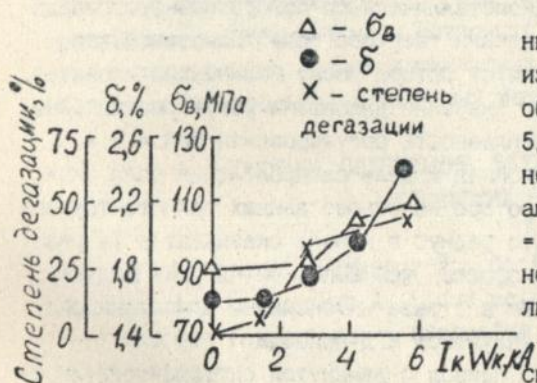


Рис. 11

Из результатов исследования следует, например, что при изменении ампер-витков седлообразной катушки $I_{кВкк}$ от 0 до 5,6 кА, скорости ω в диапазоне 25,8...57,4 рад·с⁻¹, при ампер-витках индуктора $I_{иВи} = 11,5$ кА относительное удлинение $\tilde{\delta}$ сплава типа АМГ-6 увеличивается от 1,5 до 2,4%, $\tilde{\sigma}_B$ — на 13%, а степень дегазации сплава составляет 38%, что указывает на улучшение пластичности и прочности по сравнению с исходными сплавами (рис. 11).

Сравнительный анализ результатов, полученных при исследовании комбинированных способов рафинирования алюминиевых сплавов, сочетающих вращательное движение жидкометаллического ротора с подачей в него инертного газа; введение во вращающийся ротор МГД привода рафинирующего флюса показывает на увеличение эффективности дегазации металла в 1,3...1,5 раза по сравнению с обработкой МГД методом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Обоснована целесообразность разработки электромагнитных систем МГД рафинирования с регулированием скорости жидкометаллического ротора, позволяющих снизить зарастание каналов оксидами, уменьшить содержание водорода и твердых неметаллических включений в алюминиевых сплавах, повысить их механические свойства.

2. Разработана математическая модель МГД привода, позволяющая на основе решения задачи электромагнитного поля определить электродинамические усилия и скорости вращения ротора, необходимые для повышения прочности и пластичности алюминиевых сплавов. Выполнен расчет элементов электропривода и установлено, что участки с однородным распределением магнитной индукции составляют 70% длины линейных частей седлообразной катушки. Сравнительный анализ результатов расчета угловых скоростей жидкого металла с данными эксперимента показал, что погрешность составляет не более 22%.

3. Получены электромеханические характеристики МГД привода, описывающие зависимости $\omega = f(I_{иВи})$, $\omega = f(I_{кВк})$, $\omega = f(r)$. Определено, что вращение жидкометаллического ротора электропривода существенно отличается от вращения твердого тела. Показано, что распределение скорости по радиусу ротора носит нелинейный характер. Установлено, что максимальное значение диапазона регулирования скорости составляет $D = 13:1$, а плавность регулирования $K_{пл} = 2,4$.

4. Разработана регрессионная модель распределения поля скоростей в жидкометаллическом роторе на основе данных полнофакторного эксперимента. Установлено, что радиус r канала оказывает в 14 раз большее влияние на угловую скорость, чем ампер-витки $I_{кВк}$ индукционной катушки. Величина $I_{кВк}$ в 3 раза интенсивнее влияет на скорость, чем ампер-витки $I_{иВи}$ индуктора МГД привода.

5. Разработан новый МГД привод с замкнутой системой регулирования скорости. Рассмотрен принцип построения функциональной схемы электропривода с системой электромагнитного управления для регулирования скорости и температуры ротора МГД привода. При экспериментальных исследованиях на МГД приводе получены конгломераты шаровидной формы плотностью $1,8 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, что меньше плотности жидкого алюминия ($2,35 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$) и оксидов алюминия ($3,9 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$). Показано, что в процессе МГД очистки загрязненных алюминиевых сплавов от водорода и оксидных включений последние коагулировали в крупные

частицы, а также образовались шары-конгломераты, состоящие из оксидов и газа. Установлено, что при создании вращательного движения металла стенки каналов практически не зарастали и необходимость их механической очистки отсутствовала. Толщина шлакового слоя на стенках не превышала 1-2 мм в течение месяца эксплуатации канала МГД привода.

6. Разработан электротехнический комплекс для исследования электромагнитных способов управления вращательным движением жидкого металла для процесса МГД рафинирования. Получены зависимости содержания водорода, оксида Al_2O_3 , механических свойств алюминиевых сплавов от времени рафинирования и электромагнитных параметров МГД привода. Экспериментально установлено, что эффективность рафинирования алюминиевых сплавов АЛ2, АК7, АК5М2 от оксидов Al_2O_3 и водорода при скорости ротора $\omega = 52 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$ в 2 раза выше, чем при скорости $21,3 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$. Определено, что предложенные комбинированные способы обработки алюминиевого сплава АК5М2 позволили по сравнению с промышленными в 1,4...3 раза снизить содержание в сплаве оксида алюминия, на 30% увеличить прочностные характеристики (σ_B) и пластические свойства (σ) в 1,5 раза. Использование в промышленности разработанных технологий и устройств МГД рафинирования обеспечивает увеличение выхода годных алюминиевых сплавов на 6-8%, экономию 35-40 кВтч электроэнергии на тонну металла.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В
СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Blinov V., Ehrkenov N., Gorislavets V., Kolesnichenko A., Kuchaev A., Luthkevich A. Liquid metal flows with polydispersed solid gaseous inclusions. - Symposium on liquid metal M H D. Riga. 1988. p. 14.

2. Колесниченко А.Ф., Кучаев А.А. Электромагнитная установка для исследования электрофизических процессов в жидкой дисперсной среде // Магнит. Гидродинамика. -1989. - с.143-144.

3. Кучаев А.А., Люткевич А.В. Электромагнитная установка для рафинирования жидких металлов. - В сб. Оптимизация систем питания и электрооборудования электротехнологических установок. - Киев: Ин-т электродинамики АН УССР, - 1989. - с.122-126.

4. Кучаев А.А., Люткевич А.В. Экспериментальные исследования

магнитогидродинамической сепарации алюминиевых сплавов от оксидных включений. - В сб.: Проектирование и исследование полупроводниковых и электромеханических преобразователей. - Киев: Ин-т электродинамики АН УССР, 1989. - с.190-194.

5. Кучаев А.А., Руденко Н.Г. Влияние вращающегося магнитного поля на процесс дегазации жидких алюминиевых сплавов // Литейное пр-во. - 1990. - N II. - с.13-14.

6. Нижерадзе А.А., Кучаев А.А. Об одном подходе к моделированию процесса рафинирования алюминиевых сплавов в индукционных канальных печах // Математическое моделирование в энергетике: Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф. - 23-25 октября 1990. - т.4. - Киев, 1990. - с.9-10.

7. Кучаев А.А., Жуков Л.Ф. Измерение угловой скорости движения жидкого алюминия в цилиндрическом канале электромагнитной установки // Магнит. гидродинамика. - 1991. - N 2. - с.136-138..

8. Кучаев А.А., Нижерадзе А.А. О применении регрессионного моделирования процесса рафинирования алюминиевых сплавов // Электронное моделирование. - 1991. - N 3. - с.90-93.

9. Кучаев А.А. Исследование влияния электромагнитного перемешивания на процесс рафинирования алюминиевых сплавов // Цв. металлы. - 1991. - N 4. - с.50-52.

10. Кучаев А.А. Измерение температуры жидкого алюминия в цилиндрическом канале электромагнитной установки // Технология и орг. пр-ва. - 1991. - N 3. - с.37-38.

11. Кучаев А.А. Исследования механических свойств алюминиевых сплавов, обработанных на электромагнитной установке. Киев, - 1991. - 10 с. - Деп. в УкрНИИТИ 01.07.1991, N 917-Ук-91.

12. Кучаев А.А. Экспериментальный стенд для исследования МГД процессов в электротехнологических устройствах // Магнит. гидродинамики. - 1991. - N 3. - с.120-126.

13. Кучаев А.А. Влияние изменения угловой скорости движения металла в цилиндрическом канале индукционной печи на дегазацию и механические свойства алюминиевых сплавов // Цв. металлы. - 1992. - N 12. - с.41-43.

14. Кучаев А.А. Электромагнитное управление процессом дегазации алюминиевых сплавов в цилиндрическом канале электромагнитной установки // Магнит. гидродинамика. - 1991. - N 4. - с.129-131.

15. Кучаев А.А. Моделирование электромагнитного поля, создан-

ного индукционной катушкой, размещенной на цилиндрическом канале плавильной печи // Электронное моделирование. - 1994. - в печати.

16. Жуков Л. Ф., Кучеренко С. В., Кучаев А. А. Энергосберегающие технологические процессы получения жидкого металла в индукционных печах. // Проблемы энергосбережения: Тез. докл. Всесоюзн. научн. - техн. конф. 1-3 октября 1991. - т. 2. - Киев, 1991. - с. 26-27.

17. А. С. 1527304 СССР, МКИ С 22В 21/00. Способ переплава цветных металлов в индукционной тигельной печи /Ю. М. Гориславец, А. Ф. Колесниченко, А. А. Кучаев. - Опубл. 07.12.89, Бюл. N45.

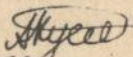
18. А. С. I6II96I СССР, МКИ С 22В 21/06. Устройство для рафинирования металла /А. Ф. Колесниченко и А. А. Кучаев. - Опубл. - 07.12.90, Бюл. N45.

19. А. С. 1680789 СССР, МКИ С 22В 9/02. Устройство для плавки и финирирования металла /Ю. М. Гориславец, А. Ф. Колесниченко, А. А. Кучаев, А. Ф. Люткевич. - Опубл. 30.09.91, Бюл. N36.

20. А. С. 1752800 СССР, МКИ С 22В 9/00, 21/06. Способ рафинирования алюминия и его сплавов /А. А. Кучаев и А. В. Наривский. - Опубл. - 07.08.92, Бюл. N29.

Личный вклад автора. В работах I...8, I6...20 опубликованных в соавторстве, автору принадлежит: в (I...5), (16) - результаты экспериментальных исследований МГД сепарации неметаллических включений в жидкометаллическом роторе ЗУ под действием вращающегося магнитного поля; в (7) - результаты исследований по измерению угловой скорости жидкого алюминия в цилиндрическом канале; в (6,8) - автором получены и проанализированы уравнения регрессии, описывающие зависимости скорости ротора от параметров МГД привода, в (I7...20) - участие автора указано в материалах заявок на А. С.

Соискатель



Подписано к печати 20.05.94
Бумага офсетная N2. Усл. - печ. л. I. 0
Усл. -кр. отт. I. 0
Тираж 120 экз. Заказ N22

формат 60x84/16
Уч. изд. лист I. 0
Бесплатно

Институт проблем энергосбережения НАН Украины
254070, Киев, 70, ул. Покровская, II
Полиграфический участок Института проблем энергосбережения НАН Украины; 254070, Киев-70, ул. Покровская, II

157060

AB 30.517