

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МИКСЕРА с электромагнитным перемешивателем на физической модели

А.Р.Христинич, к.т.н., доцент кафедры "Системы обеспечения движения поездов"
Красноярского института железнодорожного транспорта – филиала ИргУПС / hristinich_ar@krsk.igups.ru,

Р.М.Христинич, д.т.н., проф. кафедры "Теоретические основы электротехники"
Красноярского государственного аграрного университета / mer@mail.ru,

Е.В.Христинич, к.т.н., доцент кафедры "Теоретические основы электротехники"
Красноярского государственного аграрного университета / mer@mail.ru

УДК 621.31, DOI: 10.22184/2070-8963.2023.115.7.72.78

Анализ электромагнитных и тепловых полей, а именно распределение внутри и снаружи миксера, проникновение их в расплав, – до сих пор актуальная задача повышения энергоэффективности и надежности данных агрегатов. Статья позволяет оценить электромагнитное и тепловое влияние на эффективность работы физической модели миксера, что напрямую масштабируется на реальный плавильно-литейный агрегат (40–60 тонн). Представлена физическая модель миксера сопротивления с электрическими нагревателями и МГД-перемешивателем, а также с оборудованием для измерения температуры, магнитной индукции и расхода электроэнергии. Рассмотрена эффективность функционирования в основных режимах работы агрегата благодаря использованию МГД-перемешивателя при естественном охлаждении и при закрытом окне. Анализируются варианты работы магнитогидродинамического перемешивателя на разных частотах, влияние их особенностей на распределение магнитного поля в миксере. Определена оптимальная частота для перемешивания расплава в миксере сопротивления.

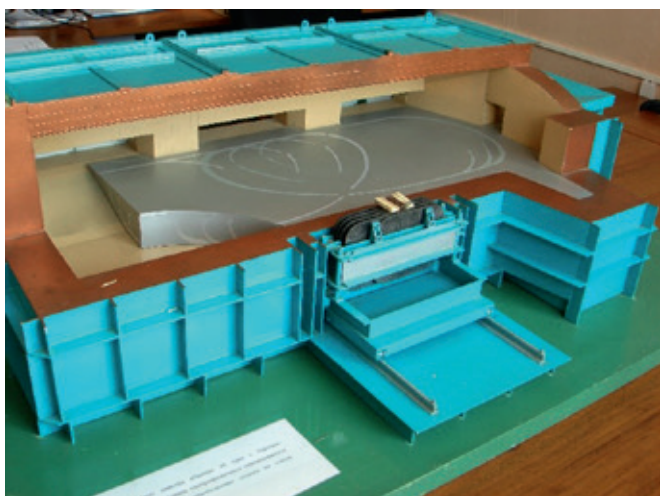


Рис.1. Макет миксера с электромагнитным перемешивателем, установленным сбоку

Получение качественных алюминиевых сплавов – первостепенная задача не только металлургической, но и смежных отраслей. Современные системы подготовки алюминиевых сплавов сложны и многофункциональны. Взаимозависимые конструктивные элементы таких систем глубоко проработаны. Однако остаются дискуссионные вопросы по ряду систем, например гидравлических, электронного нагрева, автоматизации и др., в части повышения эффективности работы плавильных агрегатов.

Исследования работы миксеров в современных условиях можно проводить по двум основным направлениям: математическое моделирование [1-3] и натурные (модельные) эксперименты [4]. Среди первоочередных направлений исследования эффективности работы миксеров сопротивления следует выделить улучшение параметров нагревательных систем [5-7] и параметров МГД-перемешивателя [8-12], от которых в конечном итоге напрямую зависит качество алюминиевых сплавов [13-15].

В приведенных модельных экспериментах использовалась физическая модель электрического миксера плавильно-литейного комплекса. Реальным аналогом данной экспериментальной установки служит электрический миксер с емкостью ванны 40-60 тонн [12, 13], макет которого представлен на рис.1. В оригинале образующая миксера в горизонтальной плоскости прямоугольной формы с размерами ванны 3×8 м. Подина миксера выполнена с восходящим наклоном в сторону рабочего окна,

для улучшения обработки расплава и чистки агрегата. В оригинальном миксере сопротивления толщина футеровки достигает 400 мм. Электромагнитный перемешиватель, а именно его основной конструктивный элемент – индуктор, установлен сбоку, напротив рабочего окна миксера. Для этого в макете выполнена врезка, а индуктор закреплен жестким соединением.

На рис.2. изображена модель печи-миксера в масштабе, а также индуктор для рассмотрения нескольких вариантов работы модели. Модель представлена ванной, которая изготовлена из немагнитной стали. Толщина стали каркаса ванны составляет 0,5 мм, а сама ванна заполнена моделирующим металлом – галлием. Нагревательные системы моделируются нагревателями как в подине ванны, так и под сводом миксера. Второй вариант является классическим исполнением, а первый вариант расположения нагревателей в футеровке в промышленном исполнении не используется.

Работа представленной модели управляется с использованием электронного блока, включающего в себя однофазные электросчетчики, измерители силы тока и напряжения, а также ноутбука. Собранный и установленный на модели двухфазный индуктор подключается к источнику однофазного напряжения по последовательно-параллельной схеме. Созданные экспериментальные условия позволяют утверждать о том, что моделируется как равномерное электромагнитное поле, так и оптимальная скорость движения металла в ванне.



Рис.2. Используемая в экспериментах модель миксера с футеровкой

Таблица 1. Электрические параметры системы нагревателей

Расположение	Сопротивление, Ом	Напряжение, В	Сила тока, А	Мощность, Вт
Под сводом	95,6	220,0	2,3	507,0
В подине	96,5	220,0	2,28	501,6

Система нагрева, расположенная под сводом, имеет параметры нагревателей, представленные в табл.1. Система измерения электрической энергии СЭБ-2АК применяется для фиксации потребления энергии моделируемой установкой в режиме реального времени. Термопары расположены в нижней части миксера, на дне ванны, а также в верхних слоях расплава галлия. Исследования эффективности перемешивания проводились индикаторами электромагнитных полей ВЕ-50И и ВЕ-метр. Данные приборы позволяют выполнять измерения частоты переменного электромагнитного поля в диапазоне от 5 до 50 Гц.

На рис.3 представлена комплексная модель с измерительными термопарами (свод модели снят).

Описываемая модель миксера работала в следующих режимах (при использовании нагревателей вверху и внизу):

- нагрев модели печи-миксера при отсутствии расплава в миксере (режим сушки футеровки);
- нагрев расплава моделируемого металла и выравнивание температуры в расплаве с применением электромагнитного перемешивателя.

Представим регламент проведения работ как при использовании электромагнитного перемешивателя, так и без него:

1. Исследуемая модель полностью закрыта, свод с нагревателями в наличии.
2. Термопара 1 располагается в расплаве галлия на расстоянии 3 мм от нижней части модели-миксера сопротивления.
3. Термопара 2 располагается в расплаве галлия на расстоянии 53 мм от нижней части модели-миксера сопротивления.
4. Температура фиксируется в режиме реального времени с применением ноутбука.
5. Системы нагрева (под сводом и в подине модели-миксера) подключены к однофазному источнику, измеряются следующие электрические величины: напряжение, сила тока, активная мощность и электрическая энергия.

Краткий анализ нагрева миксера без расплава галлия с учетом местонахождения нагревателей под сводом или в подине позволяет сделать вывод о том, что температура между термопарой 1 и термопарой 2 существенно различается в зависимости от расположения нагревателей. Температура между термопарами в случае расположения нагревателей под сводом отличается от случая в подине примерно на 15-20%. Стоит отметить, что энергетические потери в режиме сушки не столь значительны по сравнению с рабочим режимом, поэтому рассмотрим использование режима с применением расплава.

Данные фиксировались при следующих параметрах системы электронагрева: напряжение



Рис.3. Полнофункциональная модель с измерительным оборудованием

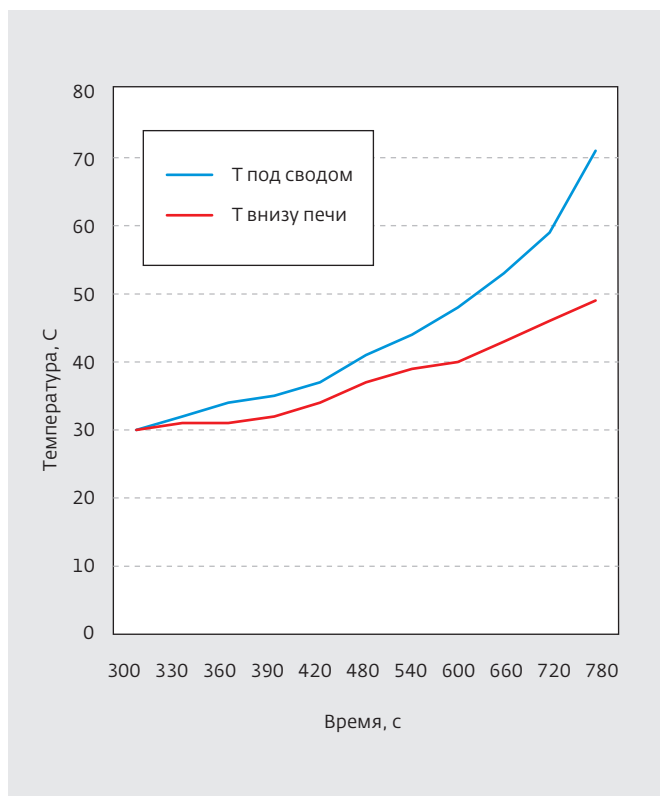


Рис.4. Изменение температуры в разрезе по высоте моделируемого расплава

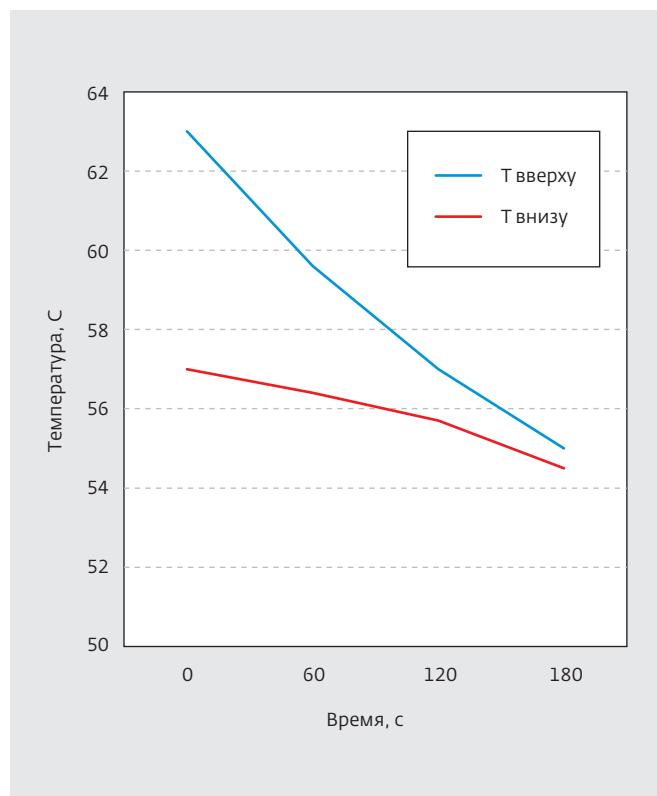


Рис.5. Измеренные данные теплового поля внутри модели-миксера при открытой двери и работающем МГД-перемешивателе

питания $U = 228$ В (не менее 220 В); питающая сила тока $I = 2,32$ А; действующее значение активной мощности $P = 528,96$ Вт.

На рис.4 отражен результат измерения тепловых изменений в модели при расположении термопар в расплаве, а нагревателей – в верхней части рабочей модели. Стоит учитывать, что основная динамика нагрева начинает проявляться через пять минут после включения всей системы. Как показывает анализ тепло-массообменных процессов в моделируемом расплаве, верхние слои расплава нагреваются быстрее, чем нижние. Это определяется передачей тепла посредством излучения и теплопередачей вверх, нижние слои нагреваются только за счет прямой теплопередачи. После отключения системы электронагрева разность температур между слоями составила 15 °С, при этом скорость нагрева стабилизировалась.

На следующем этапе работ проверялось изменение температуры, а именно скорость ее снижения при естественном охлаждении. В реальном миксере свод приоткрываться не может, только рабочее окно. Однако в экспериментальной

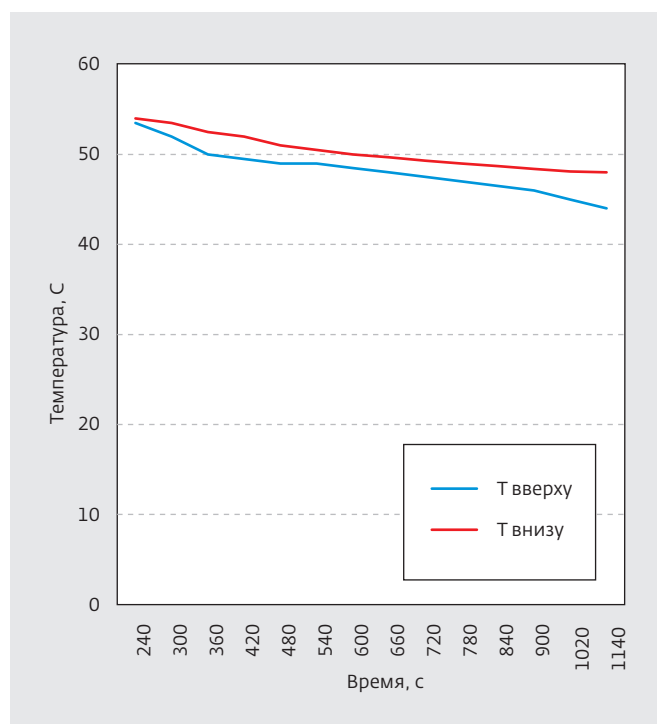


Рис.6. Температура галлия при естественном охлаждении (рабочая дверь открыта)

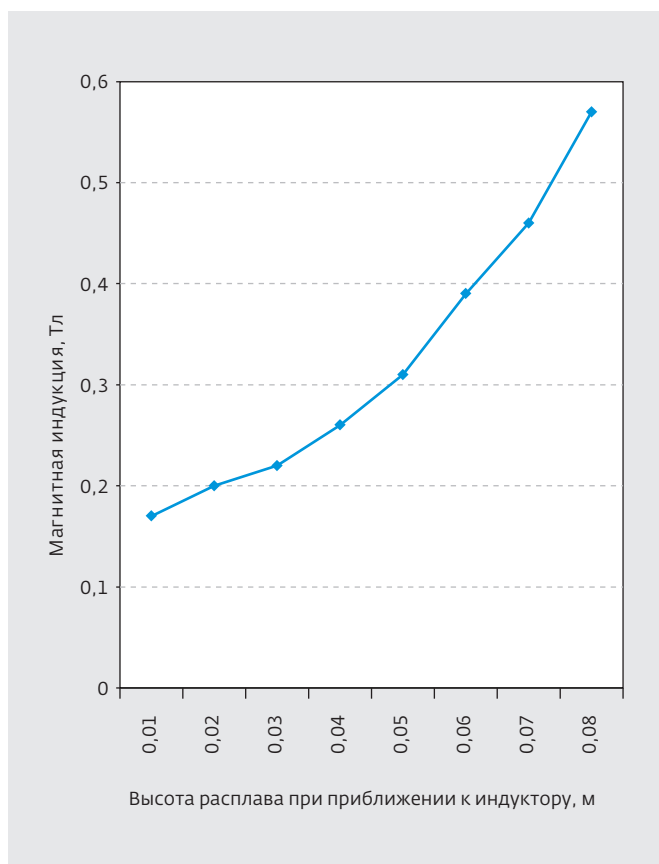


Рис.7. Распределение магнитной индукции в моделирующем расплаве галлия при частоте 50 Гц

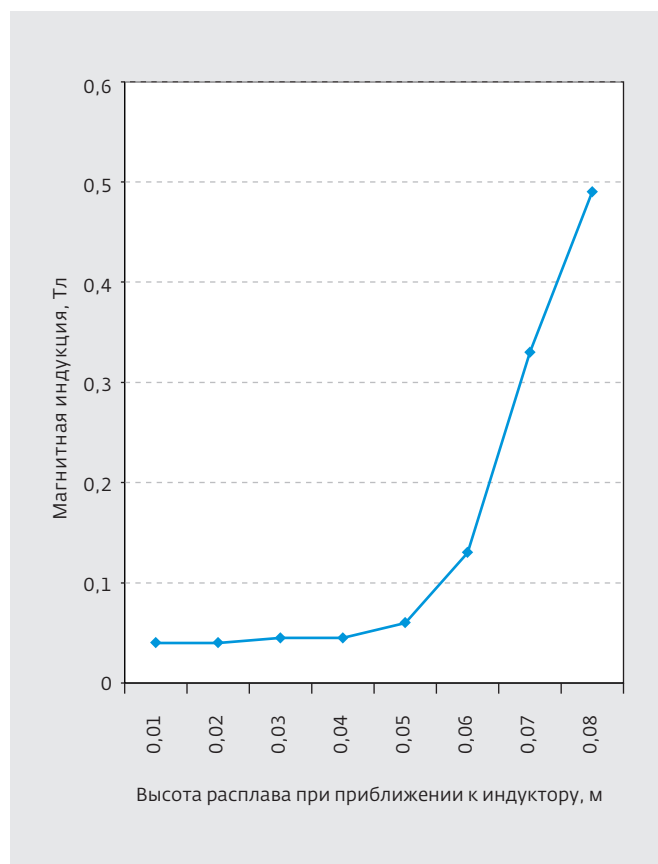


Рис.8. Распределение магнитной индукции в моделирующем расплаве галлия при частоте 25 Гц

модели использовался более агрессивный способ охлаждения – приоткрывалась крышка. При этом учитывались следующие факторы:

- система нагрева была отключена;
- температура по высоте расплава считалась стабилизированной (изменение не превышало 0,2 °С).

При проведении модельного эксперимента до включения электромагнитного перемешивателя температура в верхних и нижних слоях расплава различалась в среднем на 5–7°С. Затем в работу вступал МГД-перемешиватель, и во время эксперимента отслеживалась динамика изменения температуры в разрезе по высоте расплава. При длительности работы перемешивателя 180 с температура, можно утверждать, выравнивалась (разница не превышала 0,2 °С). Однако с учетом заполнения ванны миксера расплавом и низкой частоты электромагнитного поля 50 Гц можно отметить недостаточную эффективность выравнивания температуры в целом.

На рис.6 представлена динамика интенсивного охлаждения моделирующего расплава

галлия. Верхняя кривая отражает нижние слои, а нижняя кривая – верхние. Следует заметить, что в это время электромагнитный перемешиватель продолжает свою работу. Глубинные слои расплава охлаждаются значительно медленнее, чем верхние. При этом благодаря перемешивателю, верхние слои частично, преимущественно со стороны расположения перемешивателя в печи-миксере, проникают в глубь расплава. Таким образом, в данном случае тепломассообменные процессы с использованием также электромагнитного поля в миксере сопротивления являются взаимодополняющими факторами в едином процессе приготовления алюминиевых сплавов.

При детальном описании электромагнитных процессов, происходящих в физической модели при работе электромагнитного перемешивателя, стоит отметить, что наибольший вклад в движение расплава вносит именно магнитное поле. Однако, как известно, при переменном токе магнитное поле создает электрическое и наоборот.

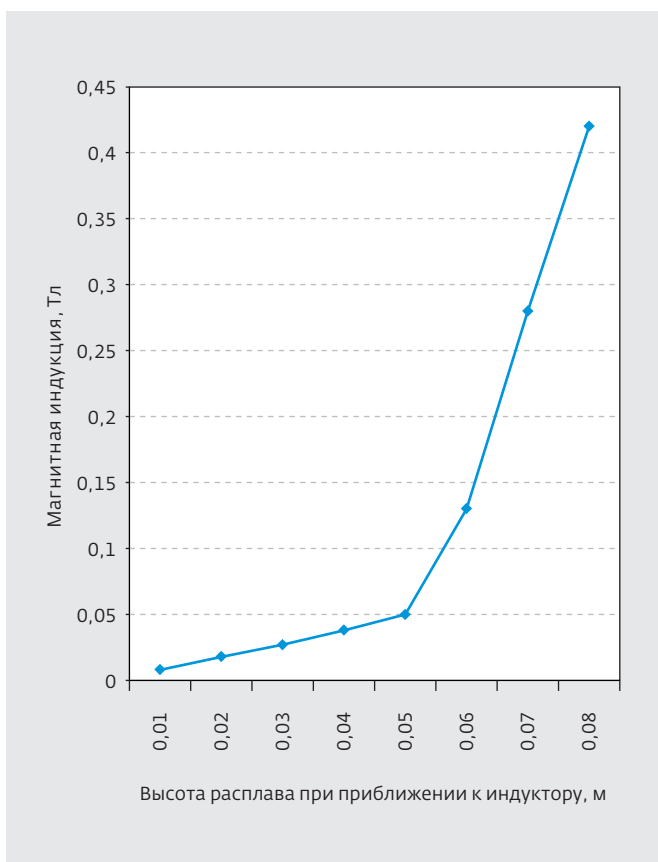


Рис.9. Распределение магнитной индукции в моделирующем расплаве галлия на частоте 5 Гц

В общем случае электромагнитное поле можно описать уравнениями Максвелла:

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{\delta} + \vec{\delta}_{\text{ст}}, \quad \text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

где \vec{H} – напряженность магнитного поля;
 \vec{E} – напряженность электрического поля;
 \vec{B} – магнитная индукция;
 $\vec{\delta} = \gamma(\vec{E} + v\vec{B})$ – плотность тока проводимости;
 $\vec{\delta}_{\text{ст}}$ – плотность сторонних токов;
 v – скорость движения расплава;
 γ – удельная электропроводность.

Решение системы уравнений поля в общем случае происходит по решению уравнений Максвелла относительно таких силовых характеристик, как напряженность электрического и магнитного полей с учетом заданных граничных условий. Значения напряженности электрического и магнитного полей комплексно можно отразить в виде:

$$\vec{E} = \vec{e}_y \dot{E}^y; \quad \vec{H} = \vec{e}_x \dot{H}_x + \vec{e}_z \dot{H}_z. \quad (2)$$

Пограничные параметры описанных величин стремятся к нулевым значениям. Ниже представлены первичные результаты работы индуктора.

На рис.7 отражено изменение величины магнитной индукции поля в экспериментальной модели. Стоит обратить внимание, что, несмотря на врезку индуктора в миксер, он огражден от расплава каркасом и слоем футеровки. При этом расплав перемешивается в любом случае. Однако с учетом значений индукции эффективность перемешивания не является достаточной для высокой интенсификации распределения температуры в расплаве. Таким образом, предлагается понизить частоту индуктора до 25 Гц, а в дальнейших экспериментах и до более низких параметров при необходимости.

Эффективность электромагнитного перемешивания приближена к максимальным значениям на частоте, составляющей несколько герц. Подтверждением этого вывода служит рис.9, на котором представлено распределение магнитной индукции на частоте 5 Гц.

Низкая частота позволяет электромагнитному полю проникать в меньший объем расплава в экспериментальной модели. Однако это помогает сконцентрировать силы Лоренца в меньшем объеме и интенсифицировать процесс перемешивания, что подтверждается высокой интенсивностью охлаждения металла.

Выводы

В статье комплексно рассмотрена эффективность работы миксера на физической модели в зависимости от таких факторов, как расположение нагревателей, работа электромагнитного перемешивателя при естественном охлаждении.

Установлено, что при работе миксера без расплава температура внутри устройства интенсивно повышается, и при расположении нагревателей в подине изменение температуры внутри модели-миксера по высоте в среднем на 15-20% меньше. Определено, что общая динамика нагрева верхних слоев моделируемого расплава превосходит динамику нагрева нижних слоев расплава в связи с нагревом верхних слоев посредством излучения и теплопередачи от нагревателей под сводом миксера и посредством только теплопередачи от нагревателей в подине миксера.

Показано, что при открытии рабочего окна, то есть при естественном охлаждении, моделируемый расплав быстро охлаждается, при этом

время охлаждения еще больше сокращается при использовании электромагнитного перемешивателя. Силовые характеристики на примере магнитной индукции изменяются по нелинейному закону, в связи с чем максимальная эффективность от проникновения электромагнитного поля в расплав достигается при частоте работы источника, а соответственно и индуктора, менее 10 Гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мартусевич Е.А., Рыбенко И.А. Совершенствование технологии получения алюминиевых сплавов в миксерах литейного отделения с использованием программно-инструментальной системы моделирования и оптимизации // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2022. № 4. С. 31–37.
2. Карабанов С.М., Суворов Д.В., Тарабрин Д.Ю., Беляков О.А., Карабанов А.С., Сливкин Е.В., Серебряков А.Е., Климаков В.В. Математическое моделирование процесса вакуумного рафинирования расплава кремния в условиях магнитогидродинамического перемешивания // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 65. С. 164–170.
3. Христинич Р.М., Христинич А.Р., Христинич Е.В. Энергетические характеристики индукционной машины с жидкометаллическим рабочим телом // Вестник КрасГАУ. 2013. № 9 (84). С. 218–223.
4. Хрипченко С.Ю., Денисов С.А., Долгих В.М., Лекомцев С.В., Павлинов А.М., Оборин П.А. Разработка и создание лабораторной модели промышленной печи с МГД-перемешиванием для алюминия и его сплавов // Вестник Пермского научного центра УРО РАН. 2018. № 1. С. 13–22.
5. Христинич Р.М., Христинич А.Р., Христинич Е.В. Анализ надежности электрических нагревателей печи промышленного назначения // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. № 2 (112). С. 60–63.
6. Винтер Э.Р., Гуляшинова А.А. Современные системы электронагрева миксеров для приготовления алюминия и его сплавов // Технологии XXI века: проблемы и перспективы развития. Сборник статей Международной научно-практической конференции. 2016. С. 65–70.
7. Темеров А.А., Михайлов Д.А. Исследование качества алюминиевых сплавов, получаемых в миксере с комбинированным нагревом // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. № 11. С. 80–84.
8. Максимов А.А., Хацаюк М.Ю., Тимофеев В.Н. Анализ влияния нормальной составляющей электромагнитных сил в процессе МГД-перемешивания расплава // Технология легких сплавов. 2018. № 4. С. 106–112.
9. Винтер Э.Р., Тимофеев В.Н. Электромагнитные силы в расплаве при магнитогидродинамическом перемешивании с системой питания импульсными токами // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Сборник научных трудов. Том 2. Под ред. В.Г. Залесского [и др.]. Минск, 2021. С. 73–84.
10. Винтер Э.Р., Тимофеев В.Н., Хацаюк М.Ю., Фомин А.В., Еремин М.А. Магнитогидродинамические перемешиватели жидких металлов с несинусоидальным током // Цветные металлы и минералы. Сборник докладов 11-го международного конгресса. 2019. С. 434–441.
11. Тяпин А.А. Индукторы электромагнитных перемешивателей алюминия // Znanstvena Misel. 2018. № 6–1 (19). С. 64–67.
12. Хрипченко С.Ю., Денисов С.А., Долгих В.М., Халилов Р.И., Павлинов А.М. Печь для алюминия и его сплавов с МГД-перемешиванием // Металловедение и современные разработки в области технологий литья, деформации и термической обработки легких сплавов. Сборник докладов научно-технической конференции. 2016. С. 30.
13. Кузнецов В.А., Морев А.Э. МГД-перемешивание алюминиевого расплава посредством перемещаемых постоянных магнитов // Интеллектуальный потенциал Сибири. Сборник научных трудов 29-й Региональной научной студенческой конференции, посвященной Году науки и технологии в России. Ч. 3. Под ред. Д.О. Соколовой. Новосибирск, 2021. С. 249–253.
14. Авдулова Ю.С., Боякова Т.А., Авдулов А.А. Эффективное перемешивание металла при малом уровне расплава в печи или миксере // Электротехника. 2020. № 4. С. 56–61.
15. Тимофеев В.Н., Хацаюк М.Ю. Анализ электромагнитных процессов магнитогидродинамического перемешивания жидких металлов // Электричество. 2017. № 1. С. 35–44.

rus-elektronika.ru



ЭЛЕКТРОНИКА РОССИИ

Выставка электронной продукции
российского производства

28|29|30
НОЯБРЯ
2023 МОСКВА
Крокус Экспо



12+

По вопросам участия в выставке обращайтесь,
пожалуйста, в Оргкомитет: +7 (812) 401 69 55, electron@mvk.ru



Организатор:



Официальная поддержка:



Партнеры:





ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 1450 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosphera.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 1300 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1800 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru