

УДК 621.746.2:66.028

**Н. А. Слажнев, К. С. Богдан, В. И. Дубоделов,
Ю. В. Моисеев, А. Ю. Кизилова**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ИНДУКЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ КАНАЛОВ ЛИТЕЙНЫХ МГД-УСТАНОВОК В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Проведен анализ специфики эксплуатации индукционного канального оборудования для алюминиевых сплавов и выделены основные аспекты, связанные с ограничением срока эксплуатации и нарушением режимов работы такого оборудования, в частности, зарастанием каналов. Анализ способов и устройств контроля и диагностики работы ИКП и Ш-образного канала МДУ показал, что для условий литейного производства наиболее приемлемыми являются бесконтактные методы контроля, основанные на измерении, регистрации и определении 3-мерного распределения магнитных полей рассеяния, индуцируемых токами повышенной плотности в индукционном канале. Приведены способ и устройство для 3-мерного определения распределения индукции магнитного поля, индуцируемого вокруг жидкометаллического витка с током, позволяющие производить диагностику зарастания канала неэлектропроводящими продуктами путем исследования распределения магнитных полей рассеяния.

Ключевые слова: индукционный канал, магнитодинамическая установка, контроль, диагностика, индукция, распределение, магнитные поля рассеяния.

Проведено аналіз специфіки експлуатації індукційного канального обладнання для алюмінієвих сплавів та виділені основні аспекти, пов'язані з обмеженням терміну експлуатації і порушенням режимів його роботи, зокрема, внаслідок заростання каналів. Аналіз способів та пристроїв контролю і діагностики роботи ІКП і Ш-подібного каналу МДУ показав, що для умов ливарного виробництва, доцільними є безконтактні методи контролю, засновані на вимірюванні, реєстрації і визначенні 3-мірного розподілу магнітних полів розсіянням, індуковані струмами підвищеної густини в індукційному каналі. Описано спосіб та пристрій для 3-мірного визначення розподілу індукції магнітного поля, індукованого навколо рідкометалевого витка зі струмом, що дозволяє проводити діагностику заростання каналу неелектропровідними продуктами шляхом дослідження розподілу магнітних полів розсіяння.

Ключові слова: індукційний канал, магнітодинамічна установка, контроль, діагностика, індукція, розподіл, магнітні поля розсіяння.

In work the analysis of induction channel equipment specific of exploitation for aluminium alloys is performed and the basic aspects related to limitation of exploitation term and violation of the

operations modes of such equipment are selected, in particular overgrowing of channels. The analysis of methods and devices of control and diagnostics of work of the ICF and W-shaped channel of MDU showed that for the terms of foundry the contactless methods of control, based on measuring, registration and determination of 3D distributing of the magnetic fields dispersion, which are inducing by the electrical currents in induction channel, are most acceptable. In work a method and device is resulted for 3D determination of magnetic field induction distributing, allowing to produce to the diagnostician overgrowing of channel by not nonconductive products by research of distributing of the magnetic fields of dispersion.

Keywords: *induction channel, magnetodynamic installation, control, diagnostics, induction, distributing, the fields of dispersion.*

Введение, состояние вопроса

Литейные магнитодинамические (МГД)-установки решают в одном агрегате ряд комплексных задач, связанных с выдержкой, внепечной обработкой, доводкой по химическому составу, легированием, модифицированием, рафинированием алюминиевого расплава в период перед его подачей в металлоприемник. Эти установки являются удачным сочетанием индукционных канальных печей (ИКП), имеющих наивысший энергетический КПД преобразования электрической энергии в тепловую (до 97 %), с возможностью реализации управляемой, безинерционной подачи алюминиевых расплавов в металлоприемник под действием электромагнитных сил по принципу МГД-насосов [1, 2].

Наряду с этим, среди особенностей конструкции и специфики эксплуатации индукционного канального оборудования для алюминиевых сплавов является ограничение срока непрерывной работы каналов индукционной единицы вследствие зарастания их внутренней поверхности неметаллическими включениями (НВ). Механизм зарастания обусловлен спецификой работы индукционного канала, а именно жидкометаллического витка алюминиевого расплава, в котором индуцируется переменный электрический ток (до 50 кА) повышенной плотности (до 60 А/мм²). В зависимости от конфигурации витка и особенностей его геометрии имеют место тепловые, электродинамические и МГД-эффекты [3]. Наличие совокупности электродинамических эффектов в жидкометаллическом витке индукционного канала приводит к возникновению специфических явлений, следствием которых является сепарация НВ с отличными от расплава параметрами электропроводности, плотности и геометрии.

Ряд других МГД-эффектов в совокупности с процессами тепломассопереноса в алюминиевом расплаве обуславливает формирование комплекса циркуляционных контуров расплава в канале. Вид, а также интенсивность процессов, связанных с взаимодействием в системе каналов таких контуров, изучались различными исследователями [3, 4]. Однако среди специалистов и разработчиков ИКП не существует единого мнения по решению проблем зарастания каналов продуктами окисления, НВ и т. п. В процессе эксплуатации ИКП и магнитодинамических установок (МДУ) вследствие зарастания каналов приходится останавливать работу оборудования и проводить вне регламентные работы по очистке каналов. Степень зарастания каналов магнитодинамических установок, в особенности для МДУ, весьма трудно определить, это можно сделать путем контроля изменения гидродинамической картины движения расплава по каналам или изменения незначительных отклонений энергетических параметров систем индуцирования тока.

Визуальный метод проверки зарастания каналов магнитодинамических установок реализуется путем включения их в режимы «нагнетания», «всасывания» или «бокового перемешивания». При этом проводится оценка пропускной способности канала в зависимости от режимов включения. Однако такую оценку можно адекват-

но провести при минимальном количестве металла в тигле МДУ (до 200 мм свыше донной части).

Цель данной работы – повышение точности определения и диагностирования состояния каналов МДУ индукционным бесконтактным методом с использованием магнитных полей рассеивания вокруг каналов.

Теоретические предпосылки

В настоящее время для диагностирования параметров электрического тока в витке используют пояс Роговского, позволяющий с достаточной точностью определять силу тока в витке Ш-образного канала. Однако этот метод не позволяет точно определить место образования локального зарастания канала из-за того, что его ширина может в 2-3 раза превысить размеры конгломерата. Кроме того, в процессе таких измерений перепады напряжения сети могут составлять до 20 % от номинального значения, что отрицательно влияет на полученные результаты. В дополнение следует отметить, что величина тока, индуцируемого в короткозамкнутом жидкометаллическом витке, наряду с реактивным сопротивлением индукционной системы, зависит также и от реактивного сопротивления витка. В данном случае удельное электрическое сопротивление расплава алюминия зависит от температуры [5].

При повышении температуры металлического расплава сопротивление увеличивается, а полупроводников и диэлектриков – уменьшается. Неоднородность температуры расплава в канале может внести дополнительную погрешность – $1,0 \cdot 10^{-5}$ Ом.

В целом электрические методы прямого или косвенного измерения силы тока для оценки степени зарастания каналов ИКП отличаются сложностью и имеют существенную погрешность. Поэтому исследователи предпочитают косвенные методы диагностики, в основу которых положен бесконтактный метод измерения пространственной картины распределения индуцированного собственным электрическим током магнитного поля [3].

Согласно закону Био-Савара-Лапласа, магнитное поле любого тока может быть вычислено как векторная сумма полей, создаваемых на отдельных участках тока.

$$dB = \frac{\mu \cdot \mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi R^2},$$

где dB – магнитная индукция, Тл; μ – относительная магнитная проницаемость среды, Гн/м; $\mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6}$ – магнитная постоянная, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; I – сила тока, А; dl – вектор, по модулю равный длине dl элемента проводника и совпадающий с направлением тока; α – угол между вектором δl и R , рад; R – расстояние от провода до точки, в которой вычисляется магнитная индукция, м.

Для магнитного поля, как и для электрического, справедлив принцип суперпозиции: магнитная индукция результирующего поля, создаваемого несколькими токами или движущимися зарядами, равна векторной сумме магнитных индукций полей, создаваемых каждым током.

Таким образом, на основании закономерности распределения индукции вокруг проводника с током в соответствии с законом Био-Савара-Лапласа в качестве перспективного метода исследования режимов работы каналов ИКП и магнитодинамических установок является метод измерения интенсивности распределения магнитной индукции полей рассеяния вокруг жидкометаллического проводника с током. Так, в случае образования в полости индукционного канала отложений продуктов зарастания, имеющих по сравнению с жидкометаллическим проводником большее удельное сопротивление, возникает искривление в 3-мерном пространстве магнитного поля с индукцией B . На рис. 1, а схематически показана взаимосвязь перераспределения тангенциальной составляющей индукции B электромагнитного поля вокруг жидкометаллического проводника, по которому протекает ток I , при изменении поперечного сечения проводника R . В этом случае, при условии протекания по локальному участку L проводника R тока I , на участке зарастания происходят ис-

кривление распределения плотности и линий тока (с учетом влияния скин-эффекта), а также увеличение расстояния от поверхности проводника на величину, равную толщине бокового зарастания ($\Delta R = 5$ мм). На рис. 1, б схематически показана эпюра распределения тангенциальной составляющей индукции по длине проводника L при условии наличия в нем неэлектропроводящего сужения поперечного сечения, которая приведена к трем значениям регистрируемой на расстоянии 50 мм от поверхности жидкометаллического проводника индукции (мТл): $B1 \approx 1$, $B2 \approx 0,5$, $B3 \approx 0,25$.

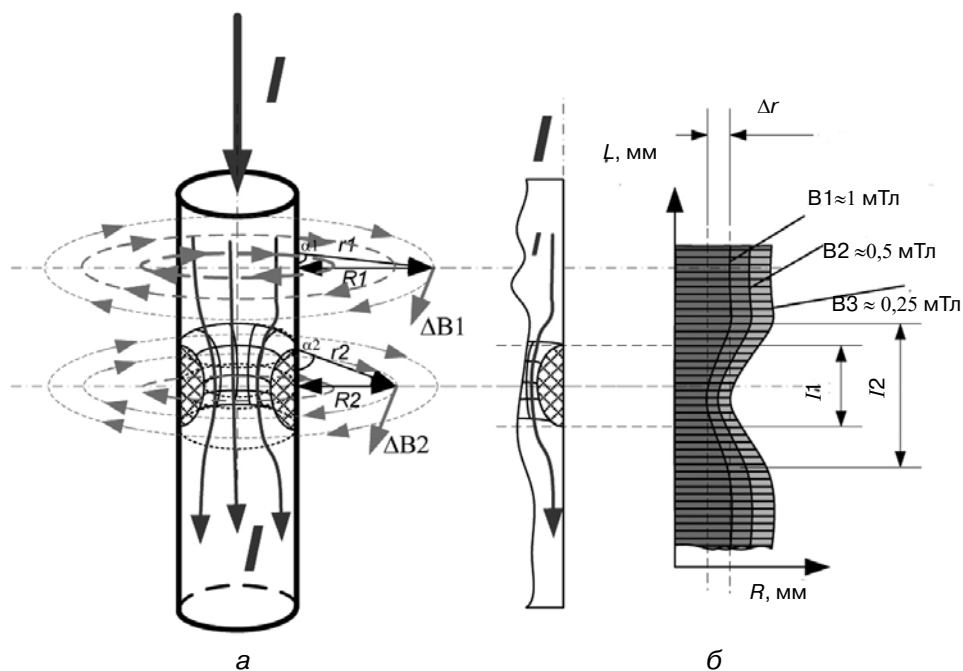


Рис. 1. Схема распределения индукции магнитного поля B , индуцированной током I в жидкометаллическом проводнике в условиях изменения электропроводящего сечения проводника относительно наружной поверхности (применительно к каналу)

Обсуждение результатов работы

Использование указанного выше эффекта дает возможность осуществлять бесконтактный контроль и диагностику степени зарастания (состояния) каналов магнитодинамической установки в процессе ее эксплуатации методом измерения тангенциальной составляющей индукции магнитных полей рассеяния при протекании тока в жидкометаллическом проводнике. Для таких измерений можно использовать традиционный датчик индукции в виде соленоида. При этом ось катушки соленоида размещают параллельно силовым линиям индукции.

Для более подробного исследования процесса перераспределения силовых линий индукции магнитного поля требуется определение не только одной тангенциальной составляющей (по оси X), а и тангенциальной составляющей по оси Y и нормальной составляющей по оси Z . Это позволяет сформировать пространственную (3D) картину распределения силовых линий индукции магнитного поля по оси канала, особенно в зоне его локального зарастания.

Для повышения точности определения отклонений режимов работы ИКП и МГД-установок и состояния их каналов от заданных значений предложили новый способ контроля режимов работы индукционных единиц и устройство для его осуществления [5, 6].

Новые методы и прогрессивные технологии литья

Для пояснения предложенного способа на рис. 2, а приведена схема диагностирования режимов работы индукционной единицы литейной МГД-установки и состояния ее каналов в процессе эксплуатации. На этой схеме: 1 – металлический расплав; 2 – тигель; 3 – индукционный Ш-образный канал; 4 – индукторы; 5 – 3D-датчик индукции; 6 – индукция магнитного поля B_2 , которая наводится переменным электрическим током в канале I_2 ; 7 – электрический ток I_2 ; 8 – электромагнит установки; 9 – индукция магнитного поля, которая наводится в левой части витка Ш-образного канала; 10 – электрический ток ($I_1 + I_2$). Выход датчика 5 подключен к микропроцессору МП (на схеме не показан).

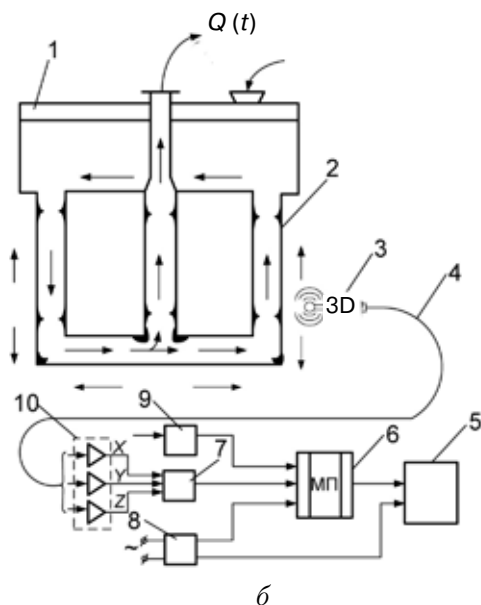
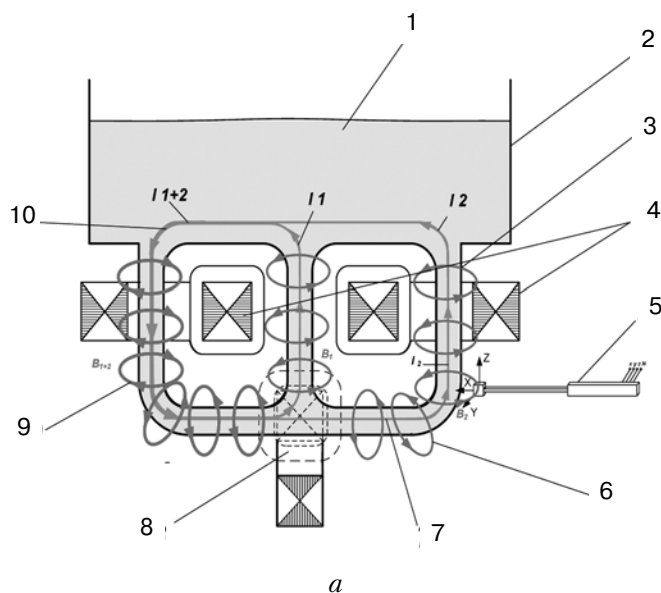


Рис. 2. Схема диагностики режимов работы индукционной единицы магнетодинамической установки и контроля состояния индукционных каналов в Ш-образном канале (а); структурно-функциональная схема устройства диагностики (б)

Принцип действия способа основан на пространственном (3D) измерении распределения интенсивности магнитных полей рассеяния вокруг каналов с помощью датчика 5, который содержит три пары взаимно перпендикулярных преобразователей Холла (X, Y, Z). При протекании переменного электрического тока 7 высокой плотности (от 10^3 А) через жидкометаллический проводник в канале 3 вокруг него индуцируется переменное магнитное поле с индукцией B . При этом конфигурация распределения интенсивности индукции B повторяет контуры сечения канала с жидкометаллическим проводником.

Структурно-функциональная схема устройства, реализующего предложенный способ, приведена на рис. 2, б. Каналы 2-ой литейной МГД-установки соединены с тиглем 1 (индукторы и электромагнит не показаны). 3-координатный датчик 3 индукции магнитного поля соединен гибким кабелем 4 с блоком 10 усилителей, подключенных к 3-канальному аналого-цифровому преобразователю 7, выход которого соединен с микропроцессорным блоком 6 измерения и программной обработки первичной информации. Выход микропроцессорного блока 6 подключен к специализированному монитору 5. В структуре устройства предусмотрен электронный ключ 8 для выбора режима работы. Питание элементов схемы осуществляется от блока 9 питания, подключенного к сети переменного тока напряжением 220 В.

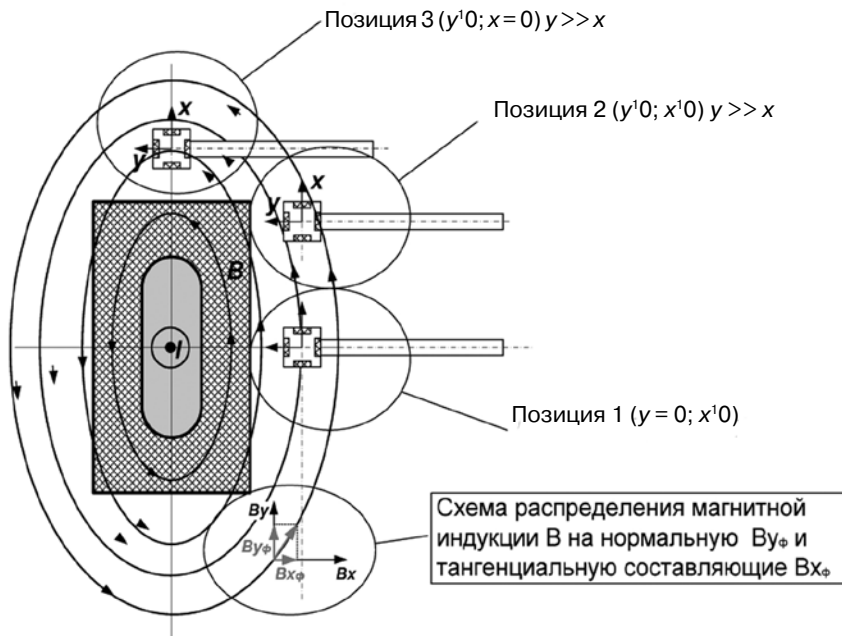
В общем случае выходные сигналы UX, UY, UZ характеризуют одну пространственную точку измерения, которая находится в геометрическом центре куба. 3D датчик позволяет реализовать непрерывное измерение нормальной (Z) и двух тангенциальных (X, Y) составляющих индукции магнитного поля на расстоянии 50 мм и более от наружной поверхности канала. При расположении 3D датчика индукции перпендикулярно к оси симметрии канала силовые линии магнитного поля замыкаются вокруг него и пронизывают чувствительные элементы 3D датчика в горизонтальной плоскости. При этом в случае, когда канал чистый (рис. 3, а), пара преобразователей датчика для измерения вертикальной составляющей индукции B по координате Z не будет ее фиксировать ($UZ = 0$).

В случае, когда геометрия канала имеет отклонения, например, при локальном зарастании участка канала в одной из боковых ветвей Ш-образного канала неметаллическими продуктами (рис. 3, б), направление протекания тока по вертикали приобретает некоторый угол, приводящий к образованию вертикальной составляющей индукции, которую воспринимает пара преобразователей 3D датчика, расположенных параллельно вертикальной оси канала. Это позволяет отслеживать места локальных изменений направления протекания тока при изменении геометрии канала в случае его зарастания.

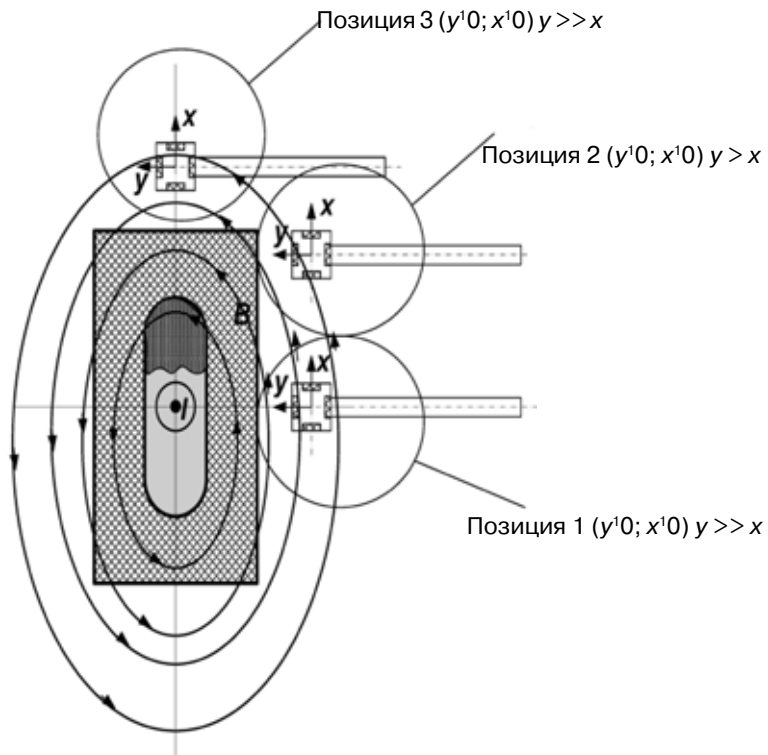
Полученная информация после ее программной обработки в блоке 6 (рис. 2, б) поступает на монитор 5, на дисплее которого высвечивается гистограмма, характеризующая состояние канала в месте расположения 3D-датчика 3. При перемещении портативного 3D-датчика вдоль поверхности каналов МГД-установки можно получить визуальную картину состояния каналов в процессе эксплуатации.

Для оценки эффективности и возможности практического применения разработанного способа и устройства с целью реализации была проведена его экспериментальная проверка на физической модели с медным шинопроводом, по которому протекал ток $I = (500 \div 600)$ А, а также апробация на магнитодинамической установке МДН-6А-0,25 путем измерения индукции магнитных полей рассеивания вокруг жидкометаллического витка каждого из каналов установки.

При этом предложенное устройство позволило получить новый технический результат, выраженный в бесконтактном 3D измерении индукции магнитных полей рассеяния вокруг каналов МГД-установки, а полученную информацию использовать для определения местоположения изменений состояния каналов. Это позволит диагностировать их состояние, своевременно устранять образовавшиеся конгломераты и возвращать установку в штатный режим работы. В результате создаются предпосылки для повышения КПД установки и экономии энергоносителей.



а



б

Рис. 3. Схема измерения 3-координатного распределения индукции магнитного поля вокруг жидкометаллического проводника с асимметричным сечением (параллелепипед, эллипс, и т. п.) при протекании через него переменного тока повышенной плотности: позиция 1 – перпендикулярно к оси симметрии жидкометаллического проводника (канала); позиция 2 – смещено к левому или правому краю канала; позиция 3 – с боковым расположением датчика индукции (перпендикулярно к оси канала в тангенциальной плоскости)

Выводы

- Проведен анализ специфики эксплуатации ИКП и магнитодинамического оборудования, а также проблем, связанных с зарастанием каналов неметаллическими продуктами и нарушением режимов работы такого оборудования.
- Определены пути установления закономерностей искривления и перераспределения индукции магнитного поля при изменении геометрии проходного сечения каналов ИКП и Ш-образного канала МГД-установки в случае зарастания неметаллическими продуктами.
- Разработано и опробовано устройство, осуществляющие бесконтактный индукционный контроль и диагностику состояния каналов ИКП и МГД-установки путем определения 3-мерного распределения магнитных полей рассеяния, индуцируемых токами повышенной плотности в индукционных каналах.



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. Весовой магнитодинамический дозатор металлических расплавов / К. С. Богдан, В. И. Дубоделов, В. Н. Фиксен и др. // *Металлургическая и горноруд. пром-сть.* – 2002. – № 5. – С. 31-34.
3. Фарбман С. А., Колобнев И. Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1968. – 496 с.
4. Влияние магнитогидродинамических процессов в рабочей зоне магнитодинамических установок на их эксплуатационные характеристики / В. И. Дубоделов, Ю. В. Моисеев, Н. А. Слажнев, К. С. Богдан и др. // *Процессы литья.* – 2013. – № 3. – С. 64-73.
5. Пат. 89415 Украина. Пристрій для електромагнітного контролю стану каналів ливарної МГД-установки / Ю. В. Моїсєєв, В. І. Дубодєлов, М. А. Слажнєв, К. С. Богдан. – Опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.
6. Альтман М. Б., Стромская Н. П. Повышение свойств стандартных литейных алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – С. 68-69.

Поступила 21.05.2014

К сведению читателей

и подписчиков!

Телефон редакции

журнала «Процессы литья»:

(044) 424-04-10