

---

# ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ, МЕХАНИЗАЦИИ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ

УДК 621.74:537.84

**Ю. В. Моисеев, А. И. Личак, Н. А. Слажнев**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## ПЕРЕМЕШИВАНИЕ И ЦИРКУЛЯЦИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПРИ ЕГО ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКЕ И РАЗЛИВКЕ

*Рассмотрены общие закономерности возникновения циркуляционных и вихревых движений жидкого металла при его плавке в индукционных тигельных и канальных печах. Показаны ограниченность естественной циркуляции жидкого металла в канальных индукционных печах и эффективность использования принципов действия электромагнитных устройств магнитодинамических насосов (МДН) для перемешивания и разливки металла.*

**Ключевые слова:** жидкий металл, плотность тока, индукция, вихревые зоны.

*Розглянуто загальні закономірності виникнення циркуляційних та вихрових рухів рідкого металу під час його плавлення в індукційних тигельних та канальних печах. Показано обмеженість природної циркуляції рідкого металу в канальних індукційних печах та доцільність використання електромагнітних пристроїв МДН для ефективного перемішування та розливання металу.*

**Ключові слова:** рідкий метал, щільність струму, індукція, вихрові зони.

*The reasons and conditions for development of circular and vortical motions in the layers of liquid metal in process of it melting in induction crucible and channel furnaces are considered. It is shown that natural circulation of liquid metal in such furnaces is limited and MDP equipment maybe used for more effective mixing and pouring of liquid metal.*

**Keywords:** liquid metal, current density, induction, vortical zone.

**В** жидком металле при электромагнитном воздействии возникает поле электромагнитных сил, приводящих в движение локальные объемы или всю массу жидкого металла, что находит практическое применение для транспортирования, разливки и дозирования жидкого металла; заливки металла в литейные формы; усреднения химического состава и температуры жидкого металла в ваннах электропечей и миксеров; отжата жидкого металла от стенок кристаллизатора и перемешивания жидкой фазы при непрерывной разливке и кристаллизации металла и др. [1-6]. Наиболее показательным является технологическое использо-

## Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

вание поля электромагнитных сил при индукционной плавке металла в тигельных и канальных печах.

Опуская технологическую сторону процесса индукционной плавки и обращаясь к динамике силового взаимодействия электромагнитного поля с жидким металлом, следует выделить, прежде всего, силовое действие объемных электромагнитных сил, описываемых зависимостью

$$\vec{F}_3 = [\vec{\delta}_2 \cdot \vec{B}_2], \quad (1)$$

где  $\vec{F}_3$  – вектор мгновенного значения электромагнитной силы в металле;  $\vec{\delta}_2$  – вектор мгновенного значения плотности индукционно наведенного тока в металле;  $\vec{B}_2$  – вектор мгновенного значения магнитной индукции в металле.

Вторичный индукционный ток, наводимый в жидком металле, по направлению противоположен первичному току в индукторе, поэтому индукция этого вторичного тока препятствует проникновению внешнего электромагнитного поля в жидкий металл, что приводит к неравномерному распределению плотности тока  $\delta_2$  и суммарной индукции  $B_2$  по глубине металла (рис. 1). Расстояние  $\Delta_2$  от боковой поверхности металла в тигле печи (по радиусу к центру), на котором магнитная индукция  $B_2$  уменьшается в « $e = 2,718...$ » раз, определяется зависимостью

$$\Delta_2 = \sqrt{\frac{2}{\mu_2 \gamma_2 \omega}}, \quad (2)$$

где  $\mu_2$  – магнитная проницаемость жидкого металла, [Гн/м];  $\gamma_2$  – удельная электрическая проводимость жидкого металла, [1/(ом · м)];  $\omega$  – частота электромагнитного поля, [рад / с].

Как следует из выражения (2), при постоянных значениях  $\mu_2$  и  $\gamma_2$  условная глубина проникновения электромагнитного поля в металле будет уменьшаться с увеличением частоты  $\omega$ .

Взаимодействие тока в индукторе и наведенного вторичного тока в жидком металле приводит к взаимному отталкиванию расплава и катушки индуктора. У торцевых поверхностей индуктора магнитное поле деформировано и изменяется направленность нормальной составляющей индукции (к боковой поверхности тигля), взаимодействие которой с наведенным током приводит к появлению в этой зоне вихревого движения металла. При однофазном питании индуктора возникают две зоны (верхняя и нижняя) вихревого движения металла (рис. 2, а, б), интенсивность которого влияет на скорость оплавления шихты и растворения вводимых в рас-

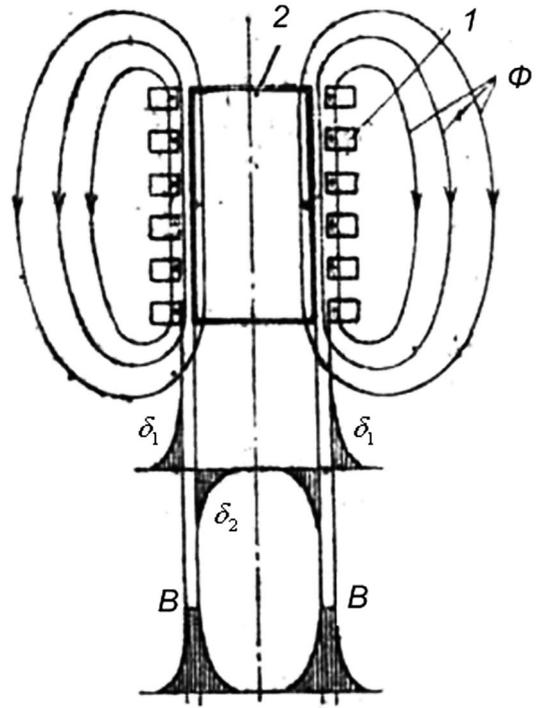


Рис. 1. Распределение плотности тока ( $\delta$ ) и магнитной индукции ( $B$ ) в системе индуктор (1) – металл в тигле (2) [6]:  $\delta_1$  – плотность тока в индукторе;  $\delta_2$  – плотность тока в металле;  $B$  – магнитная индукция

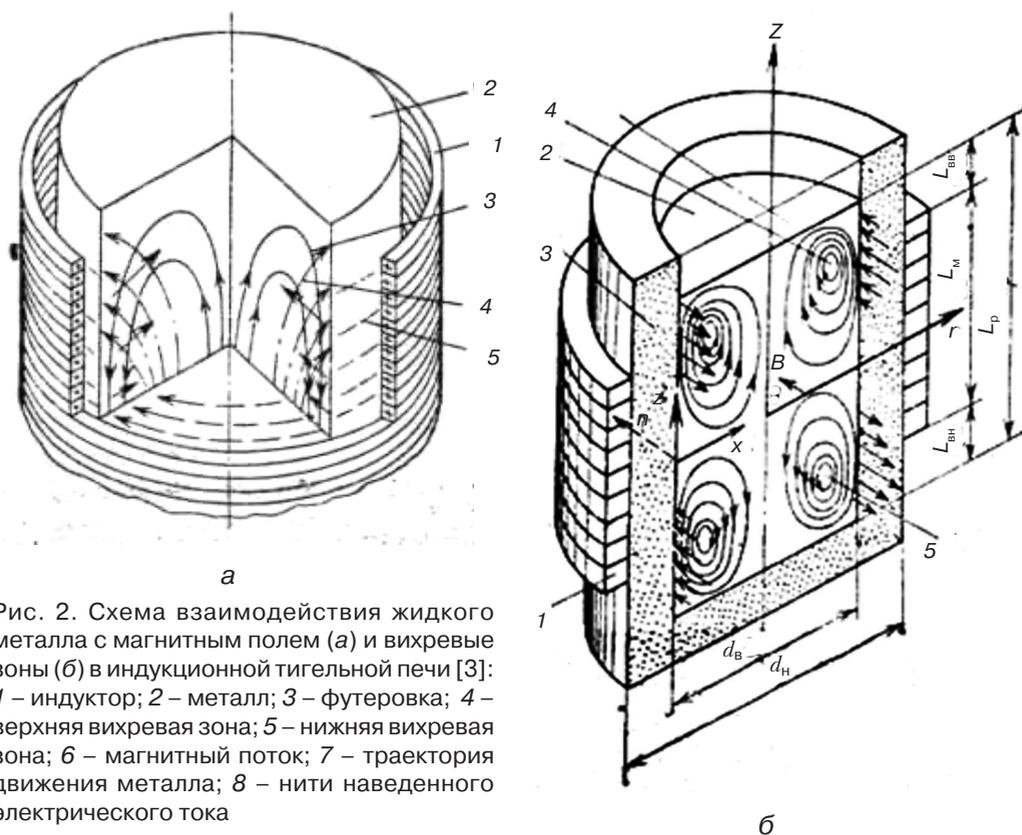


Рис. 2. Схема взаимодействия жидкого металла с магнитным полем (а) и вихревые зоны (б) в индукционной тигельной печи [3]: 1 – индуктор; 2 – металл; 3 – футеровка; 4 – верхняя вихревая зона; 5 – нижняя вихревая зона; 6 – магнитный поток; 7 – траектория движения металла; 8 – нити наведенного электрического тока

плав добавок; на условия окисления и испарения химически активных компонентов сплава; условия рафинирования и удаления в шлак неметаллических включений. Промежутки между основными вихрями могут быть заполнены вторичными вихрями, которые динамически связаны с основными и являются очагами турбулизации жидкого металла. Питание индуктора многофазным источником и использование вертикально бегущего магнитного поля позволяют получать одноконтурную циркуляцию жидкого металла по высоте расплава в тигле, но в силу различных причин этот прием используют редко.

Если в качестве показателя интенсивности циркуляции жидкого металла использовать скорость  $v_0$  движения металла вдоль вертикальной оси тигля, то можно выделить несколько основных факторов, влияющих на этот показатель.

В большинстве индукционных тигельных печей скорость циркуляции металла  $v_0$  пропорциональна силе тока в индукторе, а движение металла носит турбулентный характер [3].

Влияние частоты тока  $f$  на  $v_0$  неоднозначно в связи с относительным сужением зоны приложения электромагнитных сил по мере увеличения частоты  $f$  и уменьшением глубины проникновения электромагнитного поля в жидкий металл (рис. 3). Нижний предел частоты, соответствующий максимальному КПД печи, определяют по зависимости [6]

$$f_{\min} = \frac{3 \cdot 10^6 \cdot \zeta_2}{\mu_2 (d_2)^2}, \quad (3)$$

где  $\zeta_2$  – удельное сопротивление жидкого металла;  $\mu_2$  – магнитная проницаемость расплава;  $d_2$  – внутренний диаметр тигля.

Оптимальное значение частоты  $f$  приблизительно соответствует соотношению

$$d_2/\Delta_2 \approx 8. \quad (4)$$

Как следует из рис. 3, начальное повышение частоты тока приводит к увеличению скорости движения металла, а после достижения максимальной скорости  $v_{\max}$  дальнейшее увеличение частоты приводит к снижению  $v$  в связи с уменьшением глубины проникновения магнитного поля в жидкий металл.

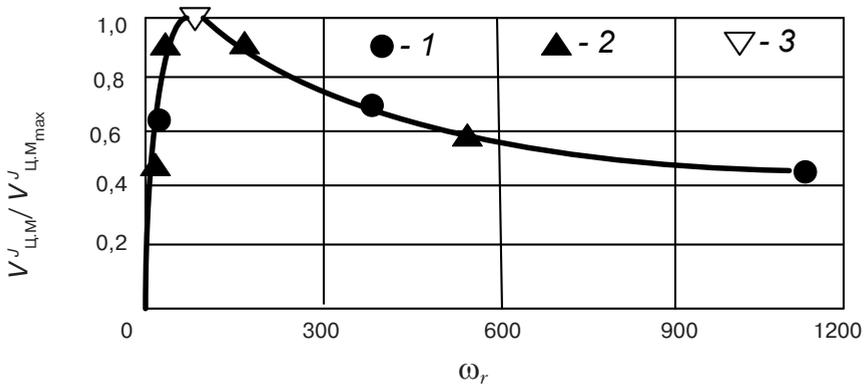


Рис. 3. Зависимость относительной скорости движения металла в верхнем контуре циркуляции от критерия относительной частоты тока [3]: 1 – оолово; 2 – алюминий; 3 – свинец

Абсолютные значения скорости движения металла в пристеночном слое, обращенном к индуктору, составляют 0,2-1,0 м/с. При плавке алюминиевых сплавов следует принимать во внимание, что критическая скорость движения металла не должна превышать 0,3-0,4 м/с, после чего поверхностная пленка разрывается и окислы замешиваются в расплав. Уменьшению скорости движения расплава будет способствовать повышение частоты тока. Эта рекомендация касается также плавки сплавов с повышенными требованиями к окисленности и газонасыщенности.

Очевидно, что режим циркуляции жидкого металла будет изменяться при смещении уровня расплава в тигле относительно верхнего торца индуктора: скорость циркуляции будет уменьшаться по мере наполнения металлом и превышения жидким металлом уровня верхнего торца индуктора. Практические исследования показали, что индукционные тигельные печи повышенной частоты тока наиболее эффективны для порционной плавки сплавов в тиглях ограниченной емкости (до 1,0 т), а печи промышленной частоты более рационально использовать для плавки с «болотом» в тиглях большой емкости с периодическим добавлением твердой шихты в жидкий металл.

В индукционных канальных печах нет таких естественных интенсивных источников сил для перемешивания жидкого металла. Возникает необходимость обеспечить конвективный теплообмен жидкого металла в каналах с ванной печи путем усиления сквозного течения металла через канал различными принудительными способами. Одним из таких способов является задание поперечному сечению канала элементов ассиметричности относительно продольной оси канала. Взаимодействие вторичного индукционного тока высокой удельной плотности в канале печи с собственным магнитным полем приводит к сжатию жидкого металла по нормали к оси канала, а элементы ассиметричности приводят к появлению составляющих электромагнитных сил, направленных вдоль оси канала. Эту же роль частично выполняют входное и выходное устья каналов, внезапное расширение которых деформирует магнитное

## **Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья**

и электрическое поле и приводит к появлению локальных циркуляционных вихревых движений металла. Взаимодействие вторичного индукционного тока в канале с магнитным полем рассеивания индуктора приводит также к появлению вихрей в поперечном сечении канала. Эти вихри, имея большое гидравлическое сопротивление, препятствуют сквозному течению металла по индукционному каналу и ведут к интенсивному разрушению футеровки.

Циркуляция жидкого металла в индукционных канальных печах обеспечивается в основном за счет перегрева металла в каналах печи и конвективного перемещения горячего металла из каналов в ванну, а холодного – из ванны в каналы. Конвекция существенно облегчается при использовании горизонтального канала, примыкающего сбоку к печи у дна плавильной ванны. Используя канал с переменным поперечным сечением, то есть с различной плотностью тока и, соответственно, с различным тепловыделением, можно задать направленную тепловую конвекцию металла вдоль оси канала, а приподняв над уровнем подины замыкающий поперечный канал и наклонив дно подины в противоположную от устья каналов сторону, можно снизить риск зарастания каналов окисными пленками, что особенно актуально при индукционной плавке алюминиевых сплавов. С этой же целью ограничивают плотность тока в каналах (не более 5 А/мм<sup>2</sup>) и перегрев металла (не более 150 °С сверх технологически приемлемой температуры металла в ванне печи).

Возможности естественной циркуляции металла обычно предусматривают при выборе конструкции индукционной печи, а для управления этим процессом используют специальные электромагнитные устройства.

Для тигельных индукционных печей наиболее эффективным и экономичным является управление перемешиванием путем изменения частоты тока в определенных пределах, ограниченных поверхностным перераспределением плотности тока или частотным модулированием тока питания индуктора.

Для канальных индукционных печей, особенно предназначенных для дозирования и разливки жидкого металла в литейные формы, наиболее эффективным оказалось использование дополнительной электромагнитной системы с разомкнутым магнитопроводом, в зазоре полюсов которого проходит канал с жидким металлом, а создаваемый электромагнитом магнитный поток перпендикулярен к направлению электрического тока в канале. Этот принцип позволяет независимо регулировать мощность индуктора (температуру жидкого металла) и скорость движения металла (гидравлический напор) в каналах печи. Различные конструктивные и технологические схемы магнитодинамических канальных печей, известных как МДН, подвергнуты систематическим исследованиям и промышленным проверкам, результаты которых изложены в монографии [4].

Пульсирующий магнитный поток, создаваемый в электромагните переменным током, замыкается через межполюсный зазор и рабочую зону канала с жидким металлом, при этом с увеличением зазора резко увеличивается рассеивание магнитного поля и уменьшается индукция в рабочей зоне. Рассеивание магнитного поля помимо необходимости повышенного расходования электрической мощности для создания требуемого при разливке металла гидравлического напора приводит к возникновению интенсивных вихрей металла в примыкающих к рабочей зоне участках канала, что затрудняет течение металла и разрушает футеровку вблизи рабочей зоны.

Исследование распределения магнитного поля в межполюсном зазоре электромагнитов различных конструкций [7] показало, что максимальную однородность индукции можно достичь в зазоре двухполюсного электромагнита с параллельным соосным расположением полюсов, но наибольшую стойкость футеровки и кон-

## **Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья**

структивные удобства представляет двухполюсный электромагнит с полюсами, расположенными под углом  $90^\circ$  друг к другу и с рабочей зоной, расположенной под углом  $45^\circ$  к торцевым плоскостям полюсов.

Компромиссное решение найдено для установки литья под электромагнитным давлением МДЛ-0,25 [8], в которой использован горизонтальный канал с приподнятой рабочей зоной над уровнем пода печи (рис. 4, а). Нижний полюс двухполюсного электромагнита удлиннен магнитомягкой вставкой на длину, несколько превышающую высоту вертикальной рабочей зоны канала, что снизило риск появления интенсивных вихрей металла вблизи рабочей зоны и позволило достичь рабочего давления

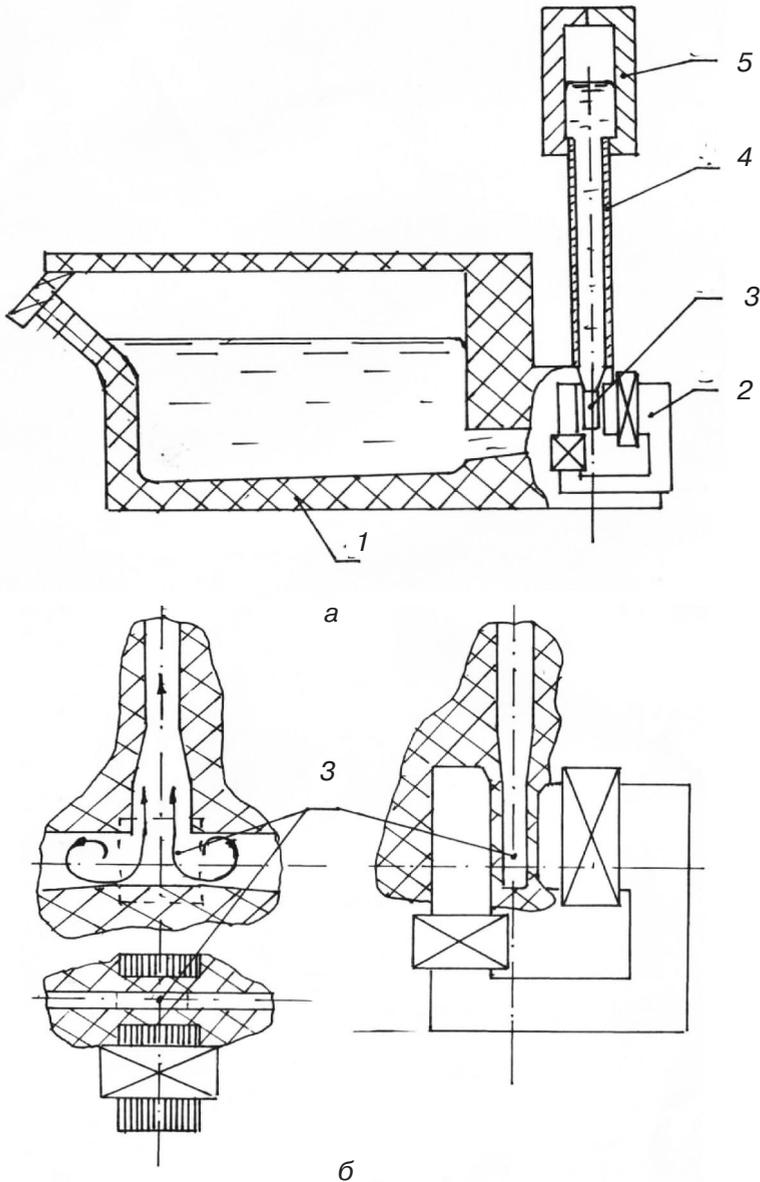


Рис. 4. Схема литейной магнитодинимической установки МДЛ-0,25 (а) и взаимное расположение рабочей зоны и полюсов электромагнита (б): 1 – ванна печи; 2 – электромагнит; 3 – рабочая зона в поперечном канале; 4 – металлопровод; 5 – литейная форма

0,045 МПа, достаточного для подпитки жидким металлом затвердевающей отливки. Следует, однако, заметить, что с увеличением длительности выдержки металла под электромагнитным давлением свыше 220 с вихри металла вблизи активной зоны начинают получать заметное развитие, при этом наблюдается локальный перегрев металла в металлопроводе на 25-30 °С. Горизонтальное расположение канала в установке МДЛ-0,25 существенно ограничивает максимальное значение плотности тока в канале до 5 А/мм<sup>2</sup>, снижает тепловую эффективность работы индукционной единицы и ограничивает производительность плавильно-разливочного агрегата как по плавлению, так и разливке.

Интенсификация процессов тепломассообмена, циркуляционного перемешивания и скорости нагрева может быть достигнута путем применения пульсирующего (импульсного) электрического тока с кратковременным, чередующимся превышением в каналах плотности тока до 25 А/мм<sup>2</sup>, без частичного или полного пережигания жидкометаллического проводника. Применение такого подхода открывает дополнительные возможности индукционных канальных и тигельных плавильных печей.

Частным примером, опробованным экспериментально, было применение амплитудной модуляции токов в Ш-образном канале МГД-установки, как результат суперпозиции переменных токов, имеющих отличающиеся, но близкие частоты (50 и 45 Гц) [9]. Этот метод позволил реализовать ряд МГД-эффектов, связанных с интенсификацией тепломассообменных процессов в индукционных каналах. Среди технологически важных было отмечено снижение зарастания поверхности каналов оксидными включениями вследствие дезорганизации стационарных тепловых и гидравлических градиентов по сечению каналов. Особенно важными среди них были дезорганизация и предотвращение образования устойчивых вихревых структур в рабочей зоне и в участках канала индукционной единицы, где происходит искривление линий токов, перераспределение его плотности и вектора электромагнитных сил [9].

Очевидно, что необходим дальнейший поиск оптимальной конструкции системы «электромагнит-рабочая зона», а также взаимосвязи систем «индуктор-электромагнит».

Особое внимание, с точки зрения поиска резервов МГД-агрегатов с тройниковыми рабочими зонами, следует уделить изучению процессов перераспределения линий тока и его плотности в рабочей зоне и ее окрестности, а также ряду МГД-эффектов, возникающих в результате взаимодействия магнитных полей токов, протекающих по жидкометаллическому проводнику, с полями рассеивания электромагнита.

Наряду с этим, применение пульсирующих, управляемых по амплитуде, частоте, форме и фазе токов и электромагнитных полей, определяет пути дальнейшего совершенствования существующего электротехнологического оборудования для плавки и электромагнитной управляемой разливки и литья алюминиевых сплавов.



### **Список литературы**

1. *Остроумов Г. А.* Физико-математические основы магнитного перемешивания расплавов. – М.: ГНТИ ЧМ, 1960. – 64 с.
2. *Верте Л. А.* Электромагнитная разливка и обработка жидкого металла. – М.: Metallurgia, 1967. – 208 с.
3. *Тир Л. Л., Столов Н. Я.* Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах. – М.: Metallurgia, 1975. – 224 с.
4. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / В. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 256 с.

## **Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья**

5. *Шидловский А. К., Гориславец Ю. М., Глухенький А. Н.* Электромагнитные системы для дозирования жидких металлов. – Киев: ИЭД НАН Украины, 2011. – 208 с.
6. Электротермическое оборудование: Справочник / Под ред. А. П. Альтгаузена. – М.: Энергия, 1980. – 416 с.
7. *Пужайло Л. П., Серый А. В., Поливода С. Л.* Сравнительный анализ характеристик электромагнитов различных конструкций, применяемых в МГД-установках для приготовления и разливки алюминиевых сплавов // Процессы литья. – 2011. – № 6. – С. 13-22.
8. *Моисеев Ю. В., Личак А. И.* Автоматизация специальных способов литья // Там же. – 2008. – № 1. – С. 20-29.
9. *Дубоделов В. И., Фикссен В. Н., Слажнев Н. А.* Интенсификация процесса массопереноса при получении алюминиевых сплавов с использованием модуляции электромагнитной силы в магнитодинамической установке // Металл и литье Украины. – 2003. – № 6. – С. 53-58.

Поступила 13.02.2013

### **ВНИМАНИЕ!**

**Предлагаем разместить в нашем журнале рекламу Вашей продукции или рекламный материал о Вашем предприятии. Редакция также может подготовить заказной номер журнала.**

**Стоимость заказного номера - 4000 грн.**

**Расценки на размещение рекламы  
(цены приведены в гривнях)**

<b>Размещение</b>	<b>Рекламная площадь</b>	<b>Стоимость, грн.</b>
<b>Рекламные блоки в текстовой части журнала</b>		
Цветные	1/2 страницы	900
	1/3 страницы	600
	1/4 страницы	300
Черно-белые	1/2 страницы	550
	1/3 страницы	380
	1/4 страницы	200
<b>Цветная реклама на обложке</b>		
Третья страница обложки	1 страница	2800
	1/2 страницы	1400
	1/4 страницы	700
Четвертая страница обложки	1 страница	3100
	1/2 страницы	1550
	1/3 страницы	1000

**При повторном размещении рекламы - скидка 15 %**

Наш адрес: **Украина, 03680, г. Киев-142, пр. Вернадского, 34/1**  
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины  
**телефоны: (044) 424-04-10, 424-34-50**  
**факс: (044) 424-35-15; E-mail: proclit@ptima.kiev.ua**