



УДК 669.187.56.530.17

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ЭШП

Ю. П. Ивочкин<sup>1</sup>, И. О. Тепляков<sup>1</sup>, И. В. Протокивиллов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН,  
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2.

E-mail: vortex@iht.mpei.ac.ru

<sup>2</sup> Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины,  
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.ua

Разработаны методика и оборудование для физического моделирования гидродинамики в токонесущем расплаве электрошлаковой печи. Физическая модель основана на использовании в качестве рабочей среды эвтектического сплава In–Ga–Sn, жидкого при комнатной температуре, и оригинальных волоконно-оптических датчиков для измерения скорости течений в объеме жидкого металла. Получены экспериментальные данные по полям скорости модельной жидкости в условиях отсутствия внешнего магнитного поля и при воздействии продольным магнитным полем, создаваемым электрическим током, протекающим по горизонтально расположенному участку токоподвода. Показано, что в условиях отсутствия внешнего магнитного поля течения жидкости представляют собой осесимметричный тороидальный вихрь с подэлектродной струей, направленной ко дну ванны. Скорость таких течений пропорциональна значению электрического тока и достигает 16 см/с. Продольное магнитное поле индукций  $B = 2 \cdot 10^{-4}$  Тл приводит к закрутке жидкости в горизонтальной плоскости (вокруг оси ванны) с максимальной скоростью течений до 5 см/с. Проведенный анализ поля скоростей показал, что азимутальное вращение жидкости способствует формированию вторичных течений в меридиональной плоскости, противоположных первичным электровихревым течениям. Указанные эффекты приводят к коренной перестройке гидродинамической обстановки в ванне и формированию сложной трехмерной структуры электровихревых течений, существенно отличающейся от упрощенной осесимметричной картины потока, которая обычно используется при описании процесса ЭШП. Библиогр. 10, ил. 7.

**Ключевые слова:** физическое моделирование; гидродинамика; токопроводящий расплав; электровихревые течения; скорость; электрошлаковый переплав; магнитное поле; электрический ток

Гидродинамика расплавов шлаковой и металлической ванн при электрошлаковом переплаве (ЭШП) оказывает существенное влияние на плавление и перенос электродного металла, физико-химические процессы на поверхностях раздела, кристаллизацию металла и, в конечном итоге, на качество выплавляемых слитков [1, 2].

Электрошлаковые технологии относятся к сильноточным металлургическим процессам, характеризующимся наличием токопроводящих расплавов с высокой плотностью электрического тока в них. Гидродинамика таких расплавов, помимо термогравитационных сил, в значительной степени определяется объемными электромагнитными силами, образующимися в результате взаимодействия электрического тока с собственным магнитным полем [2]. Порождаемые такими силами потоки токопроводящей жидкости получили название электровихревых течений (ЭВТ) [3].

Одним из методов исследования гидродинамических процессов при ЭШП является «холодное» физическое моделирование [2–6]. В качестве рабочей жидкости используют ртуть, галлий, легкоплавкие эвтектики, солевые растворы и пр. При исследовании классической схемы ЭШП (переплав цилиндрического электрода в цилиндрическом кристаллизаторе) обычно применяют двухмерное осесимметричное приближение, значитель-

но упрощающее численные и экспериментальные исследования [2, 3].

Для исследования гидродинамических процессов при ЭШП используют преимущественно горизонтально расположенные модели, заполняемые электропроводной жидкостью, свободная поверхность которой имитирует продольное сечение ванны (рис. 1, а) [2–5]. Структуру потоков жидкого металла исследуют по форме и скорости поверхностных течений, которые фиксируют при помощи мелкодисперсных порошков, наносимых на зеркало ванны. Моделирование проводят с учетом критериев подобия и размерности. В работах [2–5] показано, что в данных условиях ЭВТ представляют собой тороидальный вихрь с подэлектродной осевой струей, направленной к металлической ванне. Аналогичные тороидальные течения имеют место и в металлической ванне (рис. 1, б).

Недостатком указанных моделей является невозможность исследования течений в объеме металла, которые могут существенно отличаться от поверхностных течений. Кроме того, такие модели не позволяют воссоздавать объемные трехмерные течения. В то же время результаты производственных и лабораторных исследований свидетельствуют о наличии условий, при которых появляется спонтанная азимутальная (вокруг оси ванны) закрутка расплава, механизм которой в настоящее время

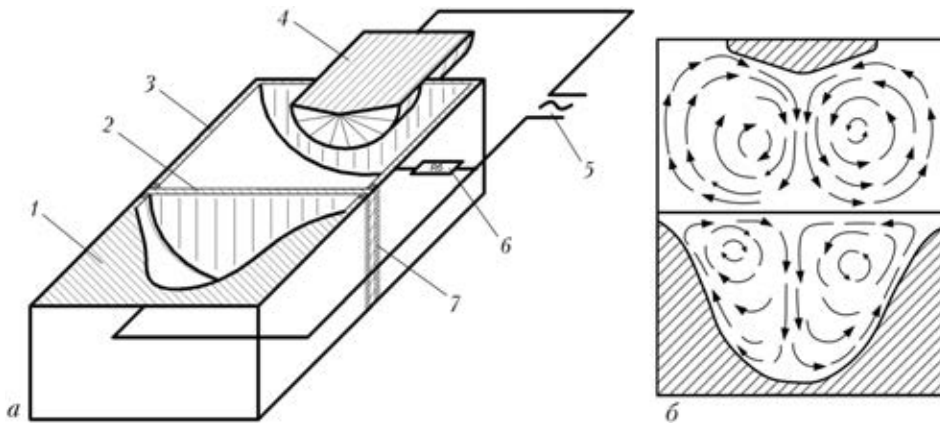


Рис. 1. Схема модели для исследования гидродинамических процессов при ЭШП (а) и характер вращения расплава (б): 1 — емкость для моделирования металлической ванны; 2 — электропроводная перегородка; 3 — емкость для моделирования шлаковой ванны; 4 — электрод; 5 — источник питания; 6 — балластный реостат; 7 — электроизолятор

недостаточно изучен. Возможные причины азимутальной закрутки связывают с влиянием внешних магнитных полей (например, поля Земли или токоподводов), асимметричностью расположения расходомерного электрода, неустойчивостью стоковых течений, эффектом МГД-динамо и др. [7, 8].

Азимутальная закрутка может приводить к коренной перестройке ЭВТ в объеме жидкого металла и оказывать существенное влияние на тепло- и массоперенос в металлургической ванне. В связи с этим изучение механизмов образования и развития таких течений важно для понимания и адекватного описания гидродинамики электрошлакового процесса.

Цель настоящей работы заключалась в разработке методики и создании соответствующих устройств для физического моделирования трехмерных ЭВТ при классической схеме ЭШП, а также исследовании влияния на характер течения жидкости внешних продольных магнитных полей, создаваемых электрическим током, протекающим по горизонтально расположенным участкам токоподвода.

**Методика проведения экспериментов.** Исследования проводили на экспериментальной установке, схема которой показана на рис. 2. В качестве рабочей жидкости,

моделирующей металлическую ванну при ЭШП, использовали эвтектический сплав 67Ga–20,55In–12,5Sn (мас. %) с температурой плавления +10,5 °С. Указанный сплав позволяет проводить моделирование с соблюдением безразмерного критерия подобия  $S = \mu_0 I^2 / \rho \nu^2$  (где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость;  $I$  — электрический ток;  $\rho, \nu$  — соответственно плотность и кинематическая вязкость среды), характеризующего движение жидкости в модели и натурном процессе. Сплав заполнял изготовленную из меди полусферическую емкость диаметром 188 мм, которая одновременно являлась одним из электродов. Другим электродом служил медный водоохлаждаемый цилиндр с торцом в форме выпуклой полусферы диаметром 6 мм, который погружали в расплав по центру ванны. Для электропитания установки использовали источник, разработанный на основе трехфазного выпрямителя переменного тока, позволяющий регулировать рабочий ток в диапазоне 50...400 А.

При проведении экспериментов (за исключением специальных условий, описанных ниже) горизонтальные части токоподвода располагали на достаточном расстоянии от рабочей зоны, чтобы свести к минимуму влияние создаваемого ими магнитного поля. В других экспериментах горизонтальный участок токоподводящего кабеля размещали в непосредственной близости от рабочей зо-

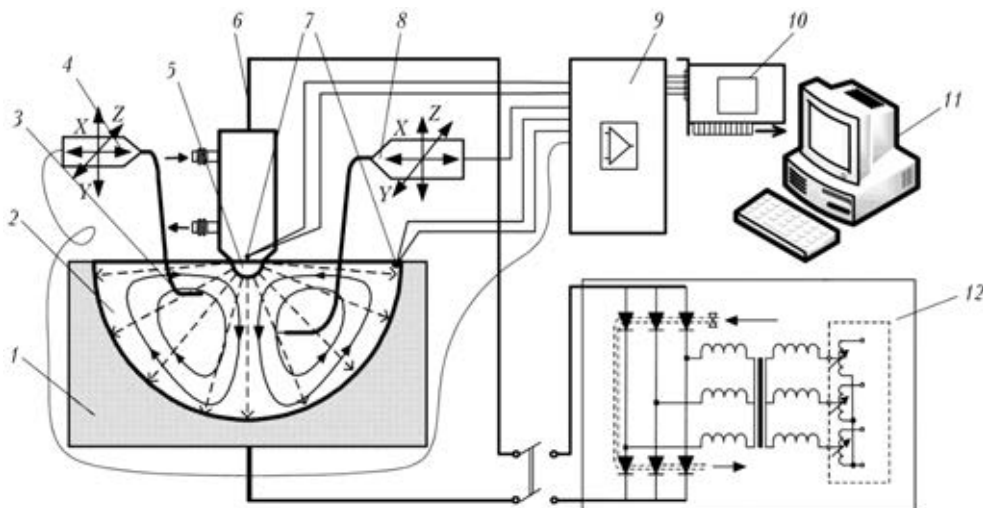


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 — медная емкость; 2 — модельная жидкость; 3 — чувствительный элемент волоконно-оптического преобразователя; 4, 8 — преобразователи скорости; 5 — электрод; 6 — токоподвод; 7 — термопары; 9 — усилитель; 10 — аналого-цифровой преобразователь; 11 — компьютер; 12 — источник питания

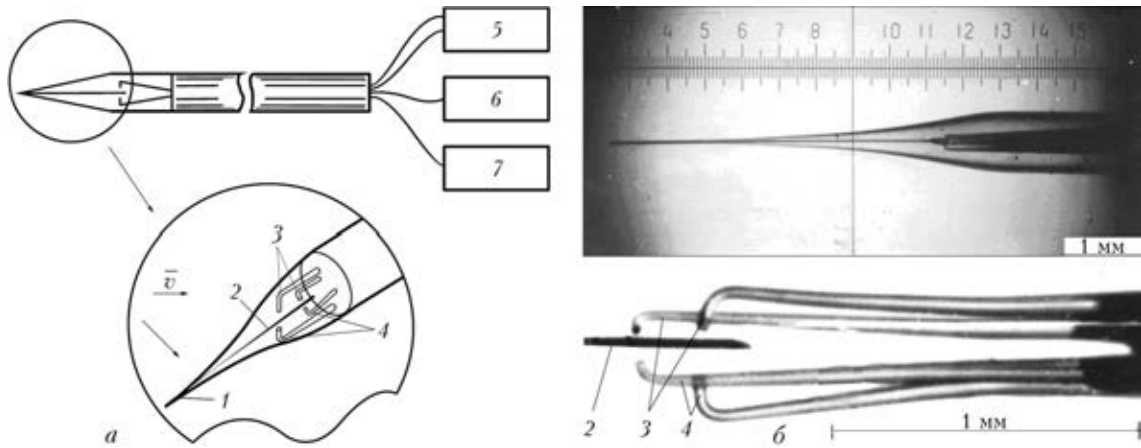


Рис. 3. Конструкция волоконно-оптического преобразователя скорости: а — схематическое изображение; б — фото датчика и волоконно-оптической системы; 1 — чувствительный элемент; 2 — стеклянный указатель; 3, 4 — световоды; 5 — источник света (светодиод); 6, 7 — фотоприемники (фотодиоды);  $\bar{v}$  — скорость течения жидкости

ны (0,15...0,4 м от оси ванны) для исследования влияния создаваемого им магнитного поля на азимутальную закрутку расплава.

Для измерения скорости течений токонесущей жидкости использовали волоконно-оптический преобразователь (рис. 3) [9], работающий следующим образом. При погружении зонда в расплав поток жидкости действует на цилиндрический чувствительный элемент на кончике тонкого стеклянного конуса. Чувствительный элемент изгибается, вызывая движение жестко закрепленного на его конце стеклянного указателя. Перемещение указателя измеряется с помощью волоконно-оптического преобразователя, состоящего из двух пар взаимно перпендикулярных изогнутых световодов, два из которых оптически связаны с источником света, а два других — с фотоприемниками. Световоды образуют два взаимно перпендикулярных луча света в воздушном зазоре. В исходном положении (при нулевой скорости) указатель перекрывает оба луча. Под действием потока жидкости чувствительный элемент изгибается, и указатель изменяет количество света, попадающего в световоды. Таким образом, уровень электрического сигнала от фотоприемника функционально связан со значениями двух компонент скорости потока жидкости.

Для калибровки датчика его помещали в ванночку с жидким металлом и передвигали с постоянной скоростью относительно неподвижной жидкости. Скорость варьировалась от эксперимента к эксперименту. В результате установлена зависимость уровня сигналов двух фотоприемников от двух компонент скорости.

**Основные характеристики датчика, калиброванного в потоке сплава In–Ga–Sn**

Диапазон измерения скорости, см/с.....	1...50
Диапазон частот, Гц.....	0...200
Размеры чувствительного элемента, мм.....	0,04×0,04×0,7
Диапазон рабочих температур, °С.....	≤90

Зонд преобразователя скорости имел Г-образную форму и крепился на координатном устройстве, позволяющем перемещать датчик в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Выходной сигнал от датчиков усиливался и фильтровался блоками формирования сигналов, затем подавался на АЦП и обрабатывался на компьютере.

Для определения скорости на поверхности расплава также использовался метод визуализации потока с помощью пузырьков водорода, выделяющихся при попадании на поверхность жидкого металла 3%-го раствора соляной кислоты ( $Ga + HCl \rightarrow GaCl_3 + H_2$ ). Значение скорости оценивали по изменению положения отдельных пузырьков на различных кадрах видеосъемки (скорость видео 25 кадров в секунду).

Для температурных измерений использовали хромель–алюмелевые и медь–константановые термопары.

Численные исследования ЭВТ выполняли на основе решения трехмерного уравнения Навье–Стокса методом контрольного объема с использованием  $k-\epsilon$ -модели турбулентности, имеющей стандартные параметры [10]. Расчет суммарного (собственного и внешнего) магнитного поля и объемной электромагнитной силы, действующей на жидкость, выполняли аналитически. Рассматривали случаи отсутствия внешнего магнитного поля и наличия поля горизонтального токоподвода.

**Результаты исследований.** Экспериментальные данные по полям вертикальной составляющей скорости ЭВТ представлены на рис. 4. Измерения выполнены на различных расстояниях  $z$  от свободной поверхности ванны при условии отсутствия внешнего магнитного поля, создаваемого током в горизонтальном участке токоподвода. Как видно, профили скорости сильно вытянуты вдоль оси, что типично для струйных течений. Максимальная скорость потоков достигает 0,16 м/с, что хорошо согласуется с данными, полученными в работах [2–5]. На вкладке рис. 4 показана зависимость скорости течения по оси ванны от электрического тока. Приведенные результаты свидетельствуют о том, что в интервале токов  $50 < I < 300$  А данная зависимость является линейной. При этом отмечено удовлетворительное соответствие между результатами расчетов и экспериментов (разность значений не превышает 12 %).

Визуальное наблюдение за поверхностью ванны показало отсутствие азимутального вращения расплава. Напротив, при экспериментах с размещением горизонтального участка токоподводящего кабеля вблизи рабочей зоны на поверхности ванны зафиксирована закрутка модельной жидкости в горизонтальной плоскости (рис. 5). Такое вращение вызвано взаимодействием осевой (вертикальной) составляющей внешнего магнитно-

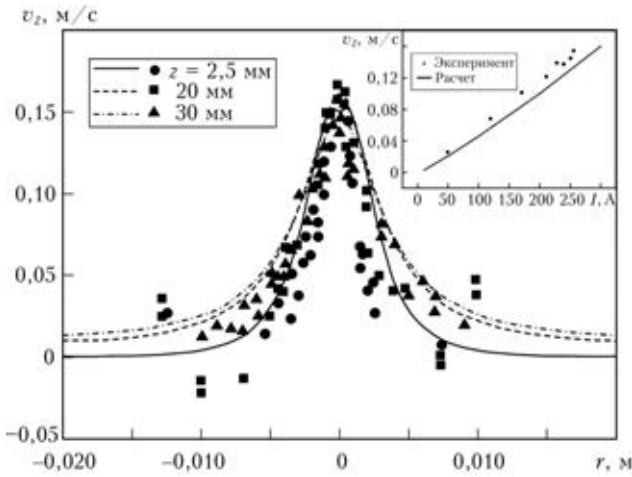


Рис. 4. Профили вертикальной составляющей скорости в приэлектродной области при  $I = 250$  А. На вкладке показана зависимость скорости по оси ванны от электрического тока при  $z = 35$  мм;  $r$  — радиус ванны

го поля от горизонтального токопровода с радиальной составляющей электрического тока в ванне.

Эксперименты показали, что вращение возникло сразу после включения электрического тока, только при довольно больших его значениях  $I \sim 400$  А, т. е. когда индукция внешнего магнитного поля в рабочей зоне составляла  $B \sim 2 \cdot 10^{-4}$  Тл. При этом азимутальная скорость, измеренная волоконно-оптическим датчиком на расстоянии 2 мм от свободной поверхности, достигала 5 см/с (рис. 5). Результаты экспериментов также свидетельствуют о хорошем соответствии используемых способов измерения скорости потоков жидкости (рис. 5).

Изменение вертикальной составляющей скорости во времени показано на рис. 6. Эксперименты и расчеты проводились при значении тока  $I = 400$  А и индукции вертикальной составляющей магнитного поля в рабочей зоне  $B = 2 \cdot 10^{-4}$  Тл. Как видно из рис. 6, после включения электрического тока ( $t = 0$ ) скорость линейно возрастает примерно до 10...14 см/с, а затем относительно медленно уменьшается до значений, близких к нулю. Очевидно, что такое изменение вертикальной составляющей скорости связано с подавлением осевого нисходящего потока вторичными течениями, вызванными взаимодей-

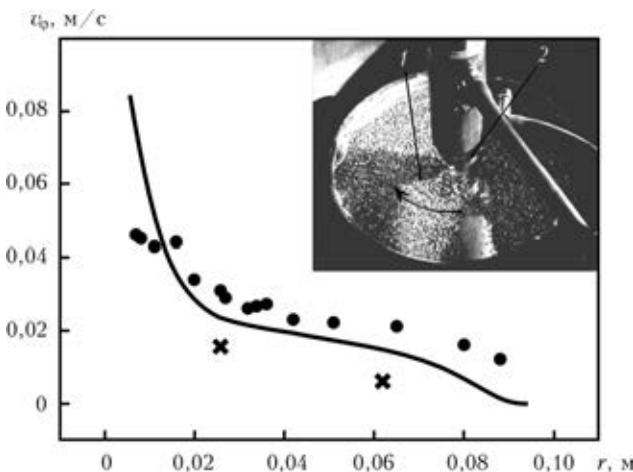


Рис. 5. Изменение азимутальной скорости течений на поверхности расплава по радиусу ванны при значении тока 400 А;  $\times$ ,  $\bullet$  — результаты экспериментов, полученные с использованием соответственно видеосъемки и волоконно-оптического датчика; — — расчетные данные; на вкладке дана фотография вращения расплава: 1 — поверхность расплава с пузырьками водорода; 2 — электрод

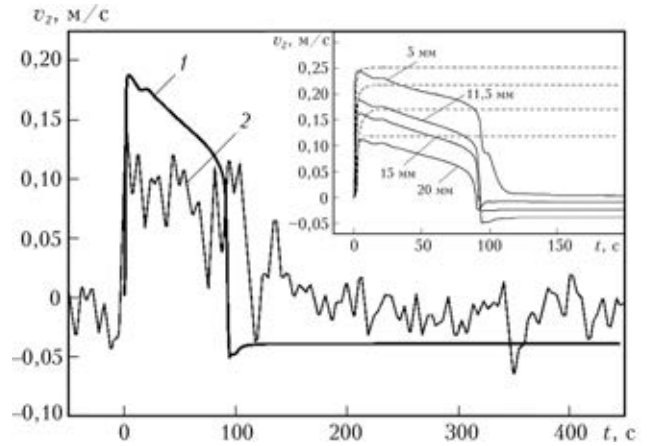


Рис. 6. Зависимость вертикальной составляющей скорости на оси ванны от времени ( $I = 400$  А,  $z = 11,5$  мм): 1 — расчет; 2 — эксперимент. На вкладке показано изменение вертикальной составляющей скорости для различных значений  $z$

ствием электрического тока с внешним продольным магнитным полем токопровода.

Анализ поля скоростей в ванне показал, что азимутальная закрутка жидкости способствует формированию вторичного тороидального вихря в нижней части ванны, направление которого противоположно первичным ЭВТ. Последний эффект фиксируется волоконно-оптическим преобразователем скорости (рис. 6). Механизм образования вторичных меридианальных течений вызван дифференциальным характером азимутальной закрутки жидкости по высоте ванны и описан в работе [3].

Интенсивность вторичных течений определяется прежде всего индукцией внешнего магнитного поля и электрическим током в жидкости. В связи с этим численное исследование структуры ЭВТ проведено при различных значениях тока и внешнего магнитного поля. Результаты соответствующих расчетов представлены на рис. 7, где площадь ниже граничных кривых соответствует структуре течения с одним устойчивым вихрем, а выше — с двумя.

На основании полученных экспериментальных данных и результатов численных исследований можно предложить следующую схему развития ЭВТ при наличии внешнего магнитного поля от электрического тока, текущего по горизонтально расположенному токо-

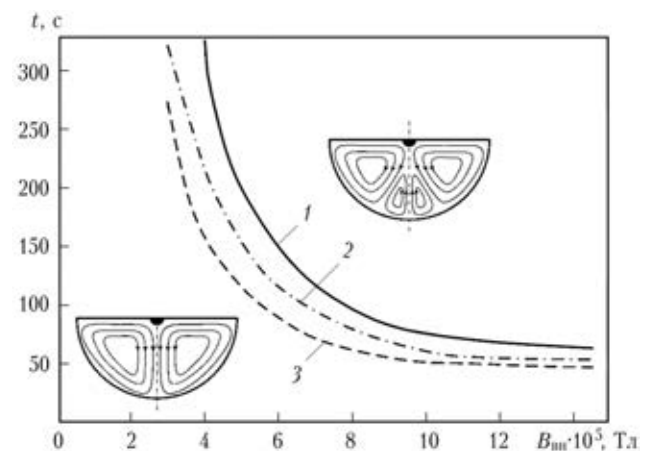


Рис. 7. Зависимость времени возникновения вторичных реверсивных течений от уровня внешнего магнитного поля для разных значений электрического тока, А: 1 — 400; 2 — 700; 3 — 1000



подводу. На начальной стадии в результате силового взаимодействия электрического тока с собственным магнитным полем в электропроводной жидкости образуется осесимметричный тороидальный вихрь, центральная часть которого представляет собой осевую струю, направленную ко дну емкости. Затем под влиянием внешнего вертикального магнитного поля возникает дифференциальное азимутальное вращение, которое в свою очередь способствует формированию вторичного восходящего потока по оси ванны. Это подъемное течение взаимодействует с первичными ЭВТ с образованием сложной трехмерной гидродинамической структуры потоков. В зависимости от интенсивности вторичных течений, определяемой электрическим током и индукцией внешнего магнитного поля, в ванне могут преобладать первичные ЭВТ, вторичные восходящие потоки на оси ванны, образовываться застойные зоны или гидродинамические структуры с двумя вихрями. Также возможно существование переходных колебательных режимов с периодическим ростом, сокращением размеров вихрей и изменением скорости потоков.

Таким образом, полученные экспериментальные и расчетные данные свидетельствуют о возможности формирования сложной трехмерной структуры электровихревых течений в условиях воздействия внешнего магнитного поля от горизонтального токоподвода. Эта структура существенно отличается от упрощенной осесимметричной картины потока, отмеченной свободной поверхности токонесущей жидкости, обычно используемой как модель ЭВТ в электрошлаковых технологиях. Трехмерность и коренная перестройка структуры исследуемых течений вызваны азимутальной закруткой потока и сильной зависимостью устойчивости ЭВТ от внешних магнитных полей. В реальных условиях ЭШП существует множество источников внешних электромагнитных полей (включая магнитное поле Земли). Поэтому указанные эффекты необходимо учитывать при численных расчетах и моделировании гидродинамики электрошлакового процесса.

## Выводы

1. Разработана физическая модель для исследования ЭВТ в токонесущем расплаве электрошлаковой печи, основан-

ная на использовании в качестве рабочей жидкости эвтектического сплава In–Ga–Sn и оригинальных волоконно-оптических датчиков скорости.

2. Получены экспериментальные данные по полям скорости модельной жидкости в условиях отсутствия и воздействия внешнего магнитного поля горизонтально расположенного токоподвода. Установлено, что продольное магнитное поле индукций  $B = 2 \cdot 10^{-4}$  Тл приводит к закрутке жидкости в горизонтальной плоскости с максимальной скоростью течений до 5 см/с.

3. Показано, что азимутальная закрутка жидкости может способствовать коренной перестройке меридиональных течений с формированием вторичного тороидального вихря, направление которого противоположно первичным ЭВТ. В зависимости от интенсивности вторичных течений в ванне могут формироваться различные гидродинамические структуры с преобладанием по оси ванны нисходящих потоков, застойных зон или восходящих потоков.

1. *Металлургия электрошлакового процесса* / Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко, В. Л. Шевцов и др. — Киев: Наук. думка, 1986. — 248 с.
2. *Компан Я. Ю., Щербинин Э. В.* Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД процессами. — М.: Машиностроение, 1989. — 272 с.
3. *Электровихревые течения* / В. В. Бояревич, Я. Ж. Фрейберг, Я. Ж. Шилова, Э. В. Щербинин. — Рига: Зинатне, 1985. — 315 с.
4. *Исследование магнитогидродинамических явлений в шлаковой ванне при ЭШП* / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Ю. Г. Емельяненко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1982. — Вып. 17. — С. 3–8.
5. *Магнитогидродинамические явления при ЭШП и кристаллизация электрошлаковых слитков* / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Ю. Г. Емельяненко и др. // Там же. — 1984. — Вып. 20. — С. 11–15.
6. *Медовар Б. И., Бойко Г. А., Сердюкова В. П.* Физическое моделирование процесса ЭШП расходуемых электродов // Там же. — 1978. — № 9. — С. 38–48.
7. *Electrically induced vortical flows* / V. Bojarevich, Ya. Frejbergs, E. I. Shilova, E. V. Shcherbinin. — Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1989. — 400 p.
8. *Петрунин А. А., Штерн В. Н.* Бифуркация полоидального поля в течении, вызванном радиальным электрическим током // Механика жидкости и газа. — 1993. — № 2. — 4 с.
9. *Жилин В. Г.* Волоконно-оптические измерительные преобразователи скорости и давления. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 112 с.
10. *Власюк В. Х.* Турбулентные электровихревые течения в цилиндрической емкости // Магнитная гидродинамика. — 1988. — 24, № 3. — С. 76–82

Method and equipment for physical modeling of hydrodynamics in current-carrying melt of electroslag furnace were developed. The physical model is based on the use of eutectic alloy In–Ga–Sn, fluid at room temperature, as a working environment and the unique fiber-optic sensors to measure the velocity of flows in the molten metal volume. The experimental data on the velocity fields of model fluid under conditions of absence of the external magnetic field and under the influence of the longitudinal magnetic field, generated by the electric current passing over the horizontally located area of the current connector, were obtained. It is shown that under conditions of absence of the external magnetic field the fluid flows represent the axisymmetric toroidal vortex with an axial stream, directed to the pool bottom. The velocity of these flows is proportional to the value of electric current and reaches 16 cm/s. Longitudinal magnetic field of induction  $B = 2 \cdot 10^{-4}$  T leads to fluid swirling in a horizontal plane (around the pool axis) at maximum flows velocity of up to 5 cm/s. The analysis of field of velocities has shown that the azimuth rotation of fluid contributes to the formation of secondary flows in the meridian plane, opposite to the primary electro-vortex flows. These effects lead to a radical restructuring of the hydrodynamic situation in the pool and formation of complex three-dimensional structure of electro-vortex flows, significantly different from the simplified axisymmetric pattern of the flow, which is commonly used to describe the ESR process. Ref. 10, Figs.7.

**Key words:** physical modeling; hydrodynamics; current-carrying melt; electro-vortex flows; velocity; electroslag remelting; magnetic field; electric current

Поступила 13.12.2012