

Особенности распределения электромагнитных и гидродинамических полей при кондукционной электротоковой обработке расплавов в различных режимах

А. В. Иванов, В. Н. Цуркин

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: dpta@iipr.com.ua*

Показаны особенности распределения электромагнитного и гидродинамического полей при кондукционной электротоковой обработке в различных режимах и вариантах электродных систем. Математическим моделированием определено, что в зависимости от типа электродной системы и режима электрического тока, проходящего через расплав, в макрообъеме расплава наблюдаются качественно различные конфигурации и распределения электрических, магнитных и гидродинамических полей. Их характер распределения определяет сферу и степень воздействия на объект обработки, что является важным при проектировании технологий электротоковой обработки расплавов.

Ключевые слова: расплав, электротоковая обработка, режимы тока, электродная система, распределение полей.

УДК 537.528: 669.017.16

DOI: 10.5281/zenodo.1168347

ВВЕДЕНИЕ

В технологиях литейного производства используют различные методы обработки расплава, что преследует, как правило, несколько целей:

- гомогенизировать расплав в макрообъеме при увеличении топологического беспорядка на мезо- и атомарном уровнях структуры;
- дегазировать расплав и вывести из него неметаллические включения;
- минимизировать отрицательные наследственные признаки шихты, которые через расплав проявляются в литом изделии.

Одним из таких методов обработки расплава как в жидком состоянии, так и при кристаллизации и твердении является кондукционная электротоковая обработка (КЭТО) [1]. Как отмечалось в работах [1–6], наличие электрического (электромагнитного) поля в расплаве при КЭТО вносит существенную корректировку в его термодинамическое состояние. Но эффективность КЭТО в первую очередь зависит от организации необходимой и достаточной интенсивности воздействия для разных температурных интервалов расплава. Технологические способы влияния электрического поля при КЭТО определяются не только параметрами источника тока, его режимами, но и типом электродной системы, которая определяет конфигурацию электрического поля в макрообъеме объекта обработки как первоисточника сферы влияния.

Анализ публикаций, посвященных решению различных задач по обработке расплава электри-

ческим током, позволяет констатировать безусловный прорыв в понимании его функциональных возможностей в технологиях литейного производства. Но многие важные аспекты этого сложного многофакторного явления остались пока не описанными, в том числе и зависимость распределения электрического поля в макрообъеме расплава при разных типах электродной системы и разных режимах электрического тока.

Цель работы – определить особенности распределения электромагнитного и гидродинамического полей в расплаве при КЭТО в различных режимах (режим постоянного тока, переменного и импульсного) для разных типов электродных систем.

ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОДНЫХ СИСТЕМ

Электромагнитное поле в расплаве генерируется с помощью электродной системы, наиболее простые варианты которой можно ограничить четырьмя типами (рис. 1). Ориентация электродов здесь и форма объема расплава (цилиндр) выбраны для упрощения постановки и решения задачи численного моделирования. Также применимы три режима тока: постоянный по амплитуде, переменный синусоидальный с частотой 50 Гц и импульсный с формой импульса в виде затухающей синусоиды с периодом порядка 10 мкс, что соответствует несущей частоте 100 кГц.

Для трех типов электродных систем (рис. 1а–в) задача решалась в осесимметричной постановке. В случае, приведенном на рис. 1г,

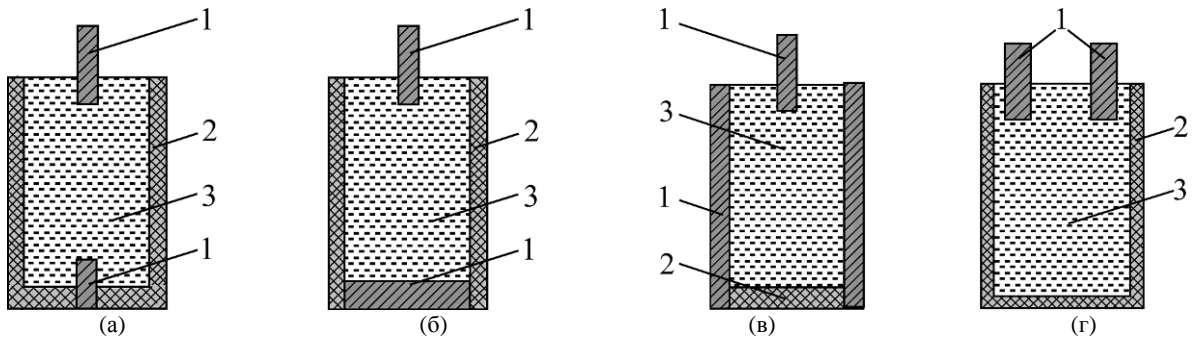


Рис. 1. Типы электродных систем: (а) – «острие – острие»; (б) – «острие-плоскость», (в) – «острие-проводящие стенки», (г) – с параллельным расположением электродов. 1 – электрод; 2 – футерованная стенка формы; 3 – расплав.

необходимо решать плоскую двумерную задачу в декартовой системе координат.

Электродная система «острие-острие» (рис. 1а) может использоваться для обработки расплава в емкости, выполненной из непроводящего материала. Состоит из верхнего погружаемого и нижнего неподвижного электродов с равными радиусами.

Электродная система «острие-плоскость» (рис. 1б) может применяться для обработки расплава в емкости с непроводящими боковыми стенками. Роль одного из электродов выполняет открытое металлическое дно емкости.

Электродная система «острие-проводящие стенки» (рис. 1в) может использоваться для обработки расплава в емкости с проводящими боковыми стенками и непроводящим дном.

Электродная система с параллельным расположением электродов (рис. 1г) предназначена для обработки расплава в любой емкости.

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Моделирование электромагнитных процессов в жидком металле при макроскопическом подходе выполним путем решения уравнений Максвелла с определенными граничными условиями, записанными в дифференциальной форме. Это позволит нам использовать для решения численные конечно-разностные методы [3, 7, 8]. При моделировании используем безындукционное приближение, то есть электромагнитное поле и гидродинамические процессы рассматриваются независимо друг от друга.

В общем случае для квазистационарного электромагнитного поля система уравнений записывается следующим образом:

$$\nabla \times H = J = \sigma(E + v \times B) + J^e, \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla \times B = 0, \quad (3)$$

$$\nabla \times D = 0, \quad (4)$$

$$\nabla \times J = 0, \quad (5)$$

где ∇ – оператор набла; H – напряженность магнитного поля в расплаве, А/м; J – плотность тока, А/м²; σ – удельная электрическая проводимость, См/м; E – напряженность электрического поля, А/м; v – скорость расплава, м/с; B – индукция магнитного поля в расплаве, Тл; J^e – плотность наведенных (сторонних) токов, А/м²; D – электрическая индукция, Кл/м.

Инвертируем тензор проводимости. Тогда уравнение (1) запишем в виде:

$$E = \sigma^{-1}(\nabla \times H - J^e) + v \times B. \quad (6)$$

Здесь, согласно закону Фарадея, общее уравнение для магнитной индукции:

$$B = \mu_0 \mu_r H + B_r, \quad (7)$$

где B_r – индукция стороннего магнитного поля, Тл; μ_0 – магнитная постоянная, $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_r – относительная магнитная проницаемость, $\mu_r = 1$.

Тогда общее уравнение для квазистационарного электромагнитного поля:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mu_0 \mu_r H + B_r) + \nabla \times (\sigma^{-1}(\nabla \times H - J^e) - v \times (\mu_0 \mu_r H + B_r)) = 0. \quad (8)$$

Для того чтобы учесть проблемы, возникающие в областях с нулевой проводимостью, μ_r и B_r представим функциями от напряженности магнитного поля, взяв частные производные по времени. Получим:

$$\left(\mu_0 H \frac{\partial \mu_r}{\partial H} + \mu_0 \mu_r + \frac{\partial B_r}{\partial H}\right) \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \times (\sigma^{-1}(\nabla \times H - J^e) - v \times (\mu_0 \mu_r H + B_r)) = 0. \quad (9)$$

При переходе к цилиндрической системе координат введем переменную u , определяемую как

$$u = H_\varphi / r, \quad (10)$$

где H_φ – радиальная составляющая магнитного поля, А/м; r – текущий радиус проводника, м.

Тогда выражение (9) после преобразований примет вид:

$$(\mu_0 \mu_r \frac{\partial H_\phi}{\partial t} + \nabla \times (\sigma^{-1} (\nabla \times H_\phi - J^e) - v \times (\mu_0 \mu_r H_\phi))) = 0. \quad (11)$$

Определив H_ϕ , можно найти плотность тока J , которая в цилиндрических координатах имеет z - и r -составляющие. Взаимосвязь с составляющими плотности тока и собственного азимутального магнитного поля (B_ϕ) определяется через уравнения Максвелла в цилиндрических координатах:

$$\vec{j}_z = \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{r} \frac{\partial r B_\phi}{\partial r} \cdot \vec{i}_z, \quad (12)$$

$$\vec{j}_r = -\frac{1}{\mu_0} \frac{1}{r} \frac{\partial r B_\phi}{\partial z} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial B_\phi}{\partial z} \cdot \vec{i}_r, \quad (13)$$

$$\vec{J} = \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{r} \frac{\partial r B_\phi}{\partial r} \cdot \vec{i}_z - \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial B_\phi}{\partial z} \cdot \vec{i}_r, \quad (14)$$

$$|\vec{J}| = \sqrt{j_z^2 + j_r^2}, \quad (15)$$

где i_r и i_z – единичные векторы.

Возникающая при этом объемная электромагнитная сила определяется из выражения:

$$\vec{F}_{ЭМ} = \vec{J} \times \vec{B}. \quad (16)$$

Примем, что движение жидкого металла возникает только под влиянием объемной электромагнитной силы, тогда гидродинамические процессы в жидком металлическом проводнике рассмотрим путем численного решения уравнения Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости при $\nabla \vec{v} = 0$ [7, 8]:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -(v \times \nabla)v + \gamma \Delta P + \frac{\vec{F}_{ЭМ}}{\rho}, \quad (17)$$

где $\vec{F}_{ЭМ}$ – объемная электромагнитная сила, Н/м³; Δ – оператор Лапласа; γ – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; ρ – плотность расплава, кг/м³; P – давление, Па.

Примем, что плотность сторонних токов $J^e = 0$ и напряженность магнитного поля на оси Z равна 0. Начальные условия приняты нулевыми: $H_f|_{t=0} = 0$; $I|_{t=0} = 0$; $\vec{v}|_{t=0} = 0$.

Проанализируем разные варианты поставленной задачи для трех различных режимов тока. Для этого формулу тока $I(t)$ зададим в виде:

– режима постоянного тока:

$$I(t) = I_A = \text{const},$$

где I_A – сила тока, А;

– режима переменного тока в форме синусоиды:

$$I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t),$$

где $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – круговая частота тока, рад·с⁻¹; t – время, с; I_0 – амплитудное значение тока, А; f – частота тока, Гц.

– режима импульсного тока в форме затухающей синусоиды:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{(-R/2L)t} \cdot \sin(\omega \cdot t),$$

где I_0 – амплитудное значение тока, А; L – индуктивность разрядного контура, Гн; R – активное сопротивление разрядного контура, Ом; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – круговая частота импульса тока, рад·с⁻¹; t – время, с; f – частота тока, Гц.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчеты выполняли для жидкометаллического алюминиевого проводника со следующими геометрическими параметрами: высота $H_0 = 100$ мм и радиус $R_0 = 40$ мм, толщина проводящей стенки $III = 2$ мм. Погружаемые электроды радиусом $R_e = 2$ мм, материал электродов – титан. Температура проводника 700°C, проводимость алюминия при этой температуре $\sigma_{Al} = 3,8 \times 10^6$ См/м, проводимость титана $\sigma_{Ti} = 6,6 \times 10^5$ См/м. Для режима постоянного тока сила тока $I_A = 20$ А, для режима переменного и импульсного тока выбирались такие параметры, чтобы среднеквадратичное значение тока также было 20 А. То есть амплитудное значение I_0 для переменного тока составляло 28 А, для импульсного – 200 А.

Распределения плотности тока, напряженности магнитного поля (в виде изолиний), электрического поля (векторного поля в виде линий потока) и поля течений (в виде векторного поля) для электродной системы «острие-плоскость» для постоянного тока приведены на рис. 2 и 3. Для переменного тока в форме синусоиды с частотой $f = 50$ Гц такие же распределения для электродной системы «острие-плоскость» приведены на рис. 4 и 5. Для импульсного тока в форме затухающей синусоиды параметры подбирались так, чтобы частота $f = 100$ кГц, количество периодов – 6. Соответствующие распределения для электродной системы «острие-плоскость» приведены на рис. 6 и 7.

Построим аналогичные графики для электродной системы «острие-острие». В этом случае данные по постоянному току показаны на рис. 8 и 9, по переменному току – на рис. 10 и 11, импульсному – на рис. 12 и 13.

Из приведенных данных на рис. 2–13 видно, что существенная концентрация электромагнитного поля происходит в приэлектродных зонах, что является причиной возбуждения вихревых потоков расплава. Если же сравнить результаты

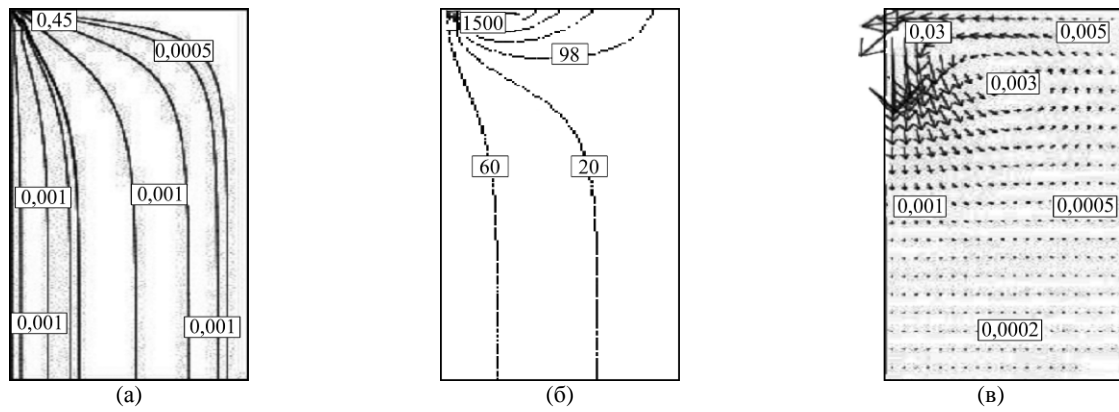


Рис. 2. Распределение электромагнитного поля и поля течений в системе «острие-плоскость», режим постоянного тока: (а) – распределение напряженности электрического поля, В/м; (б) – распределение напряженности магнитного поля, А/м; (в) – распределение поля течений, м/с.

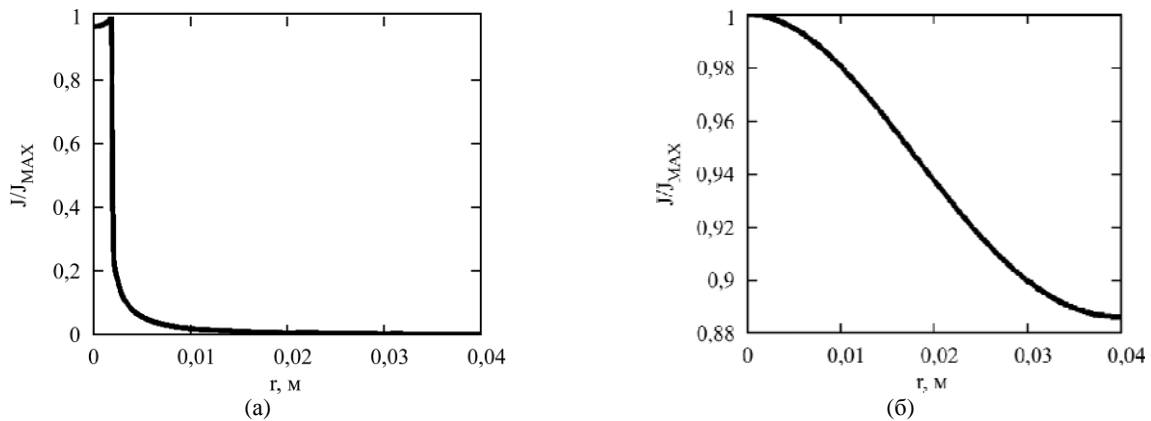


Рис. 3. Относительное распределение плотности тока в системе «острие-плоскость», режим постоянного тока: (а) – распределение на поверхности расплава; (б) – распределение по центральному сечению.

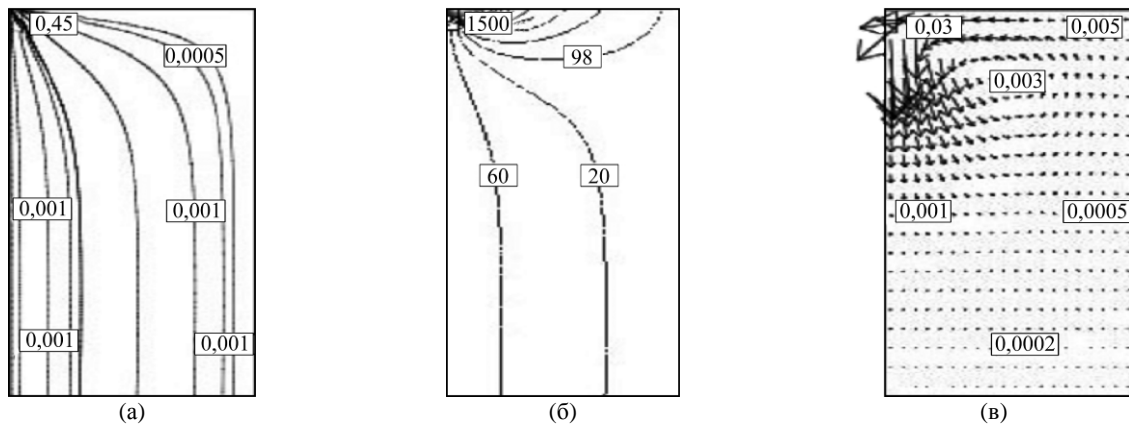


Рис. 4. Распределение электромагнитного поля и поля течений в системе «острие-плоскость», режим переменного тока: (а) – распределение напряженности электрического поля, В/м; (б) – распределение напряженности магнитного поля, А/м; (в) – распределение поля течений, м/с.

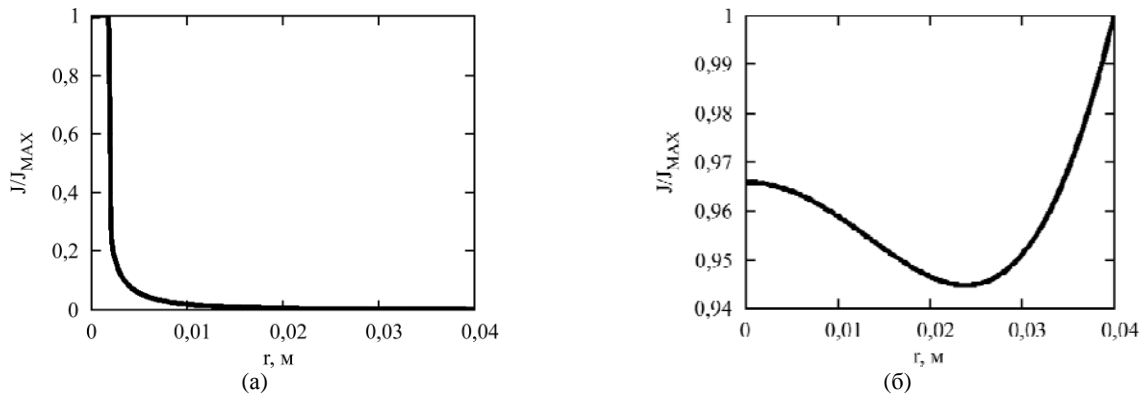


Рис. 5. Относительное распределение плотности тока в системе «острие-плоскость», режим переменного тока: (а) – распределение на поверхности расплава; (б) – распределение по центральному сечению.

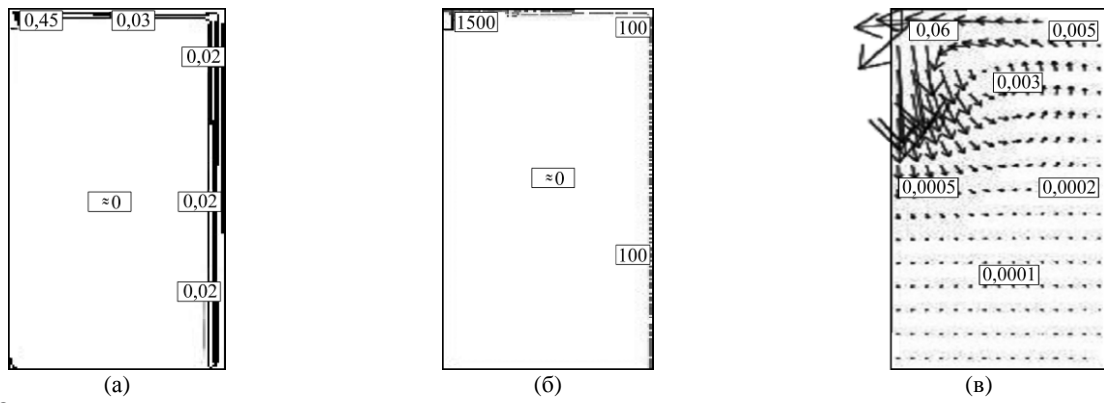


Рис. 6. Относительное распределение электромагнитного поля и поля течений в системе «острие-плоскость», режим импульсного тока: (а) – распределение напряженности электрического поля, В/м; (б) – распределение напряженности магнитного поля, А/м; (в) – распределение поля течений, м/с.

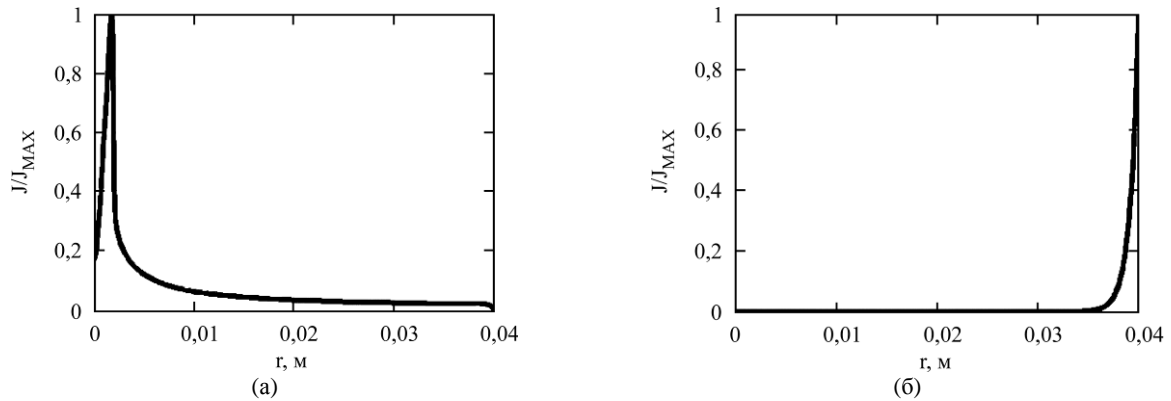


Рис. 7. Распределение плотности тока в системе «острие-плоскость», режим импульсного тока: (а) – распределение на поверхности расплава; (б) – распределение по центральному сечению.

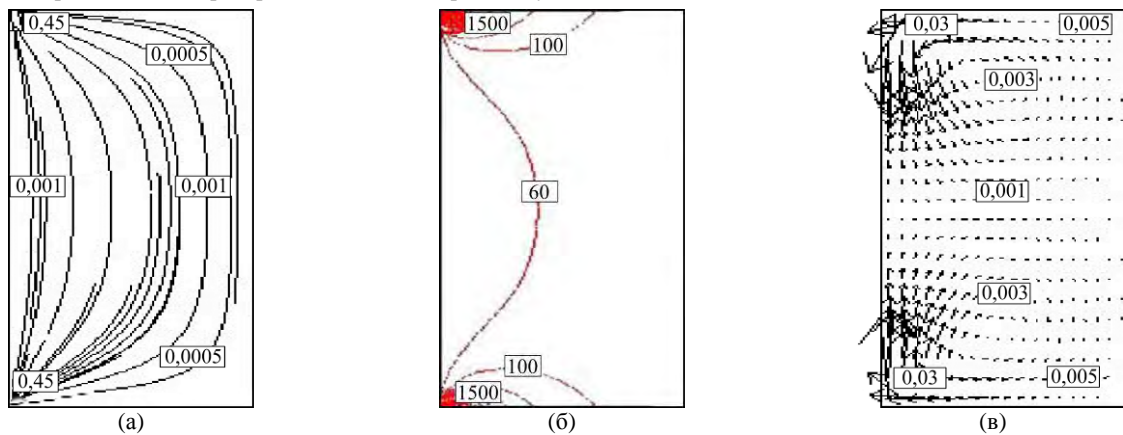


Рис. 8. Распределение электромагнитного поля и поля течений в системе «острие-острие», режим постоянного тока: (а) – распределение напряженности электрического поля, В/м; (б) – распределение напряженности магнитного поля, А/м; (в) – распределение поля течений, м/с.

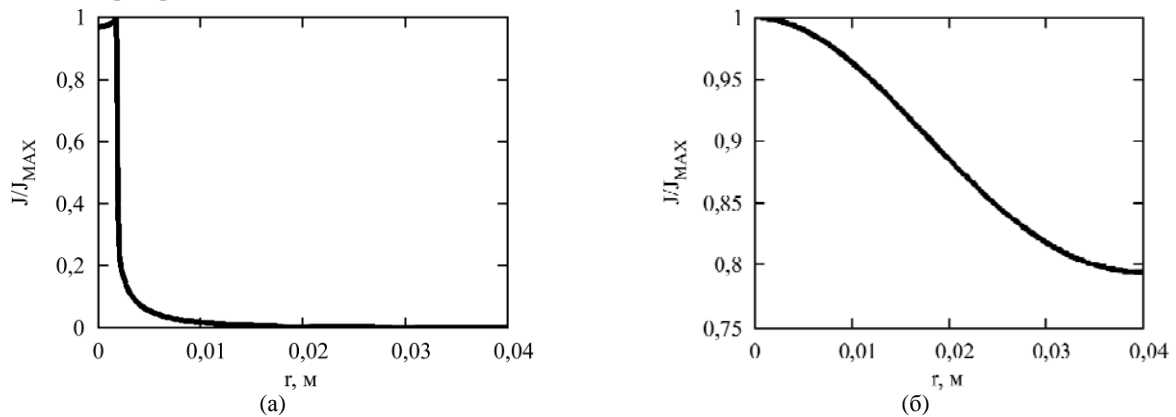


Рис. 9. Относительное распределение плотности тока в системе «острие-острие», режим постоянного тока: (а) – распределение на поверхности расплава; (б) – распределение по центральному сечению.

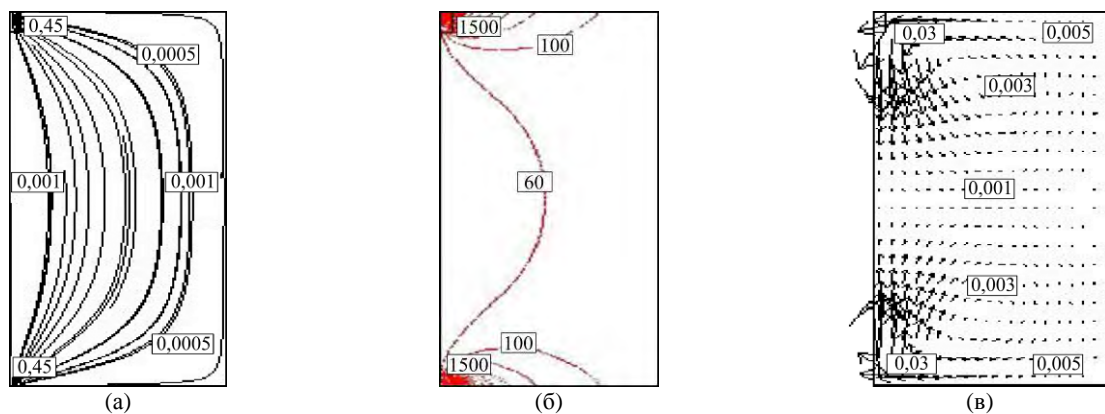


Рис. 10. Распределение электромагнитного поля и поля течений в системе «острие-острие», режим переменного тока: (а) – распределение напряженности электрического поля, В/м; (б) – распределение напряженности магнитного поля, А/м; (в) – распределение поля течений, м/с.

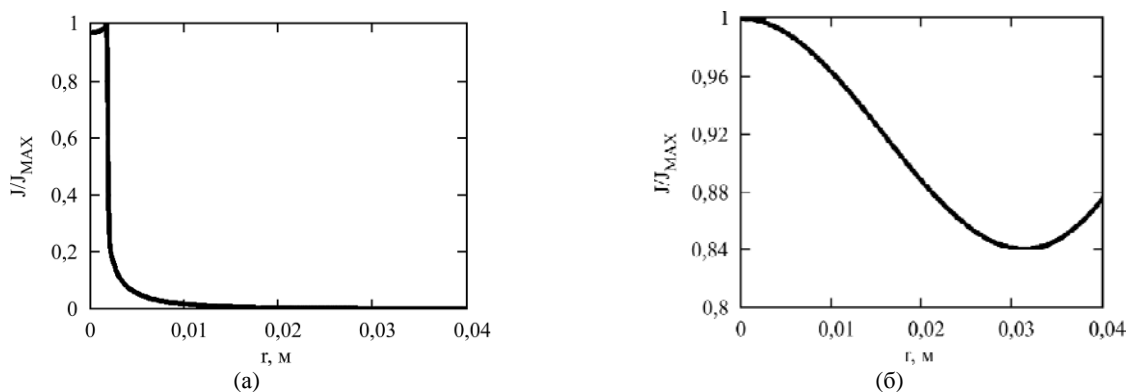


Рис. 11. Относительное распределение плотности тока в системе «острие-острие», режим переменного тока: (а) – распределение на поверхности расплава; (б) – распределение по центральному сечению.

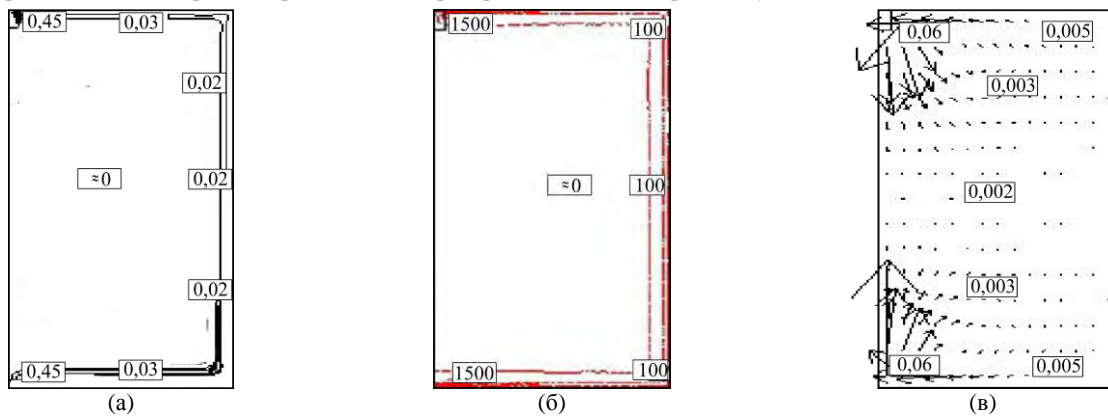


Рис. 12. Распределение электромагнитного поля и поля течений в системе «острие-острие», режим импульсного тока: (а) – распределение напряженности электрического поля, В/м; (б) – распределение напряженности магнитного поля, А/м; (в) – распределение поля течений, м/с.

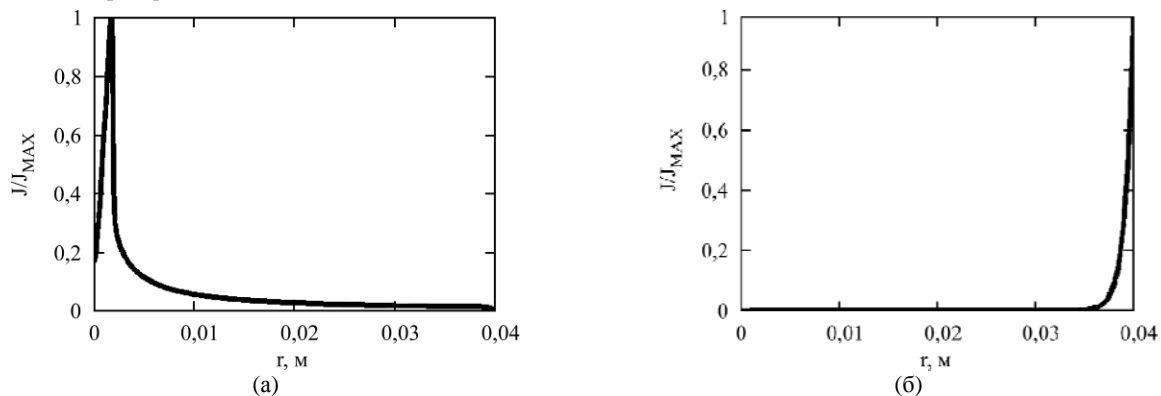


Рис. 13. Относительное распределение плотности тока в системе «острие-острие», режим импульсного тока: (а) – распределение на поверхности расплава; (б) – распределение по центральному сечению.

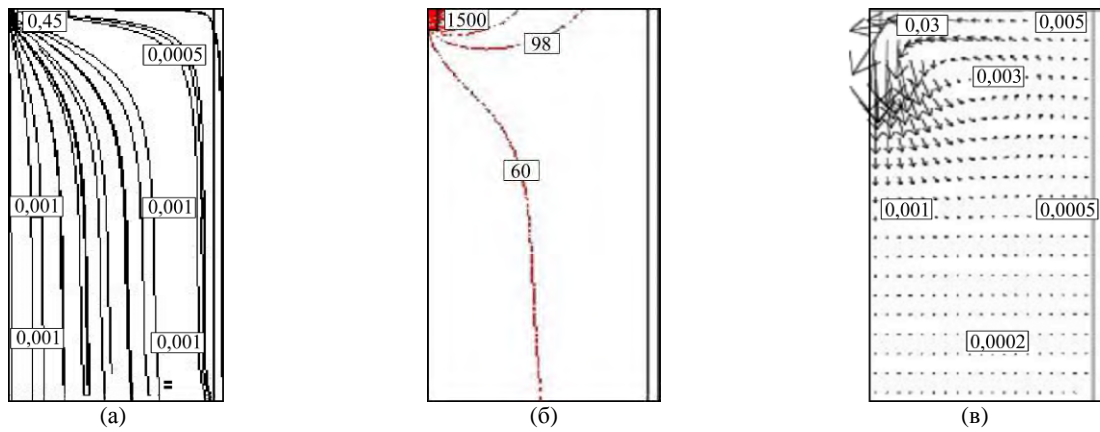


Рис. 14. Распределение электромагнитного поля и поля течений в системе «острие-проводящие стенки», режим постоянного тока, титановые электроды: (а) – распределение напряженности электрического поля, В/м; (б) – распределение напряженности магнитного поля, А/м; (в) – распределение поля течений, м/с.

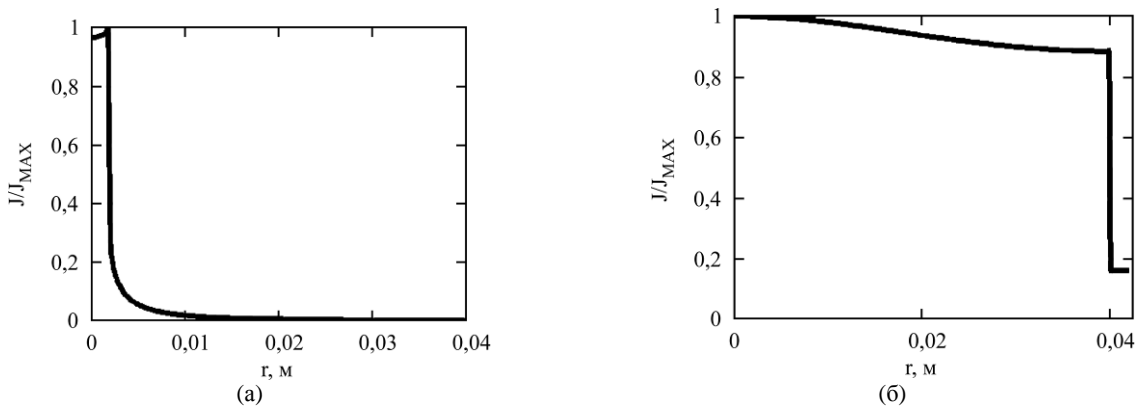


Рис. 15. Относительное распределение плотности тока в системе «острие-проводящие стенки», режим постоянного тока, титановые электроды: (а) – распределение на поверхности расплава; (б) – распределение по центральному сечению.

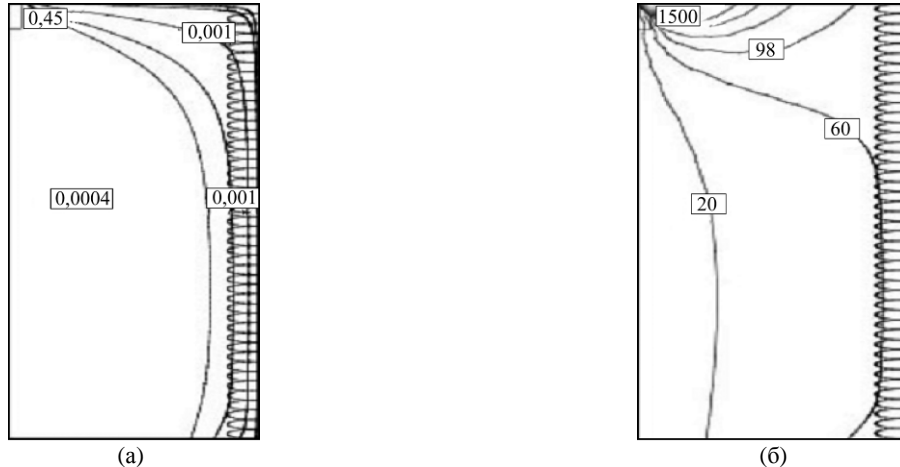


Рис. 16. Относительное распределение электрического и магнитного полей в объеме расплава при наличии растущих дендритов: (а) – распределение напряженности электрического поля, В/м; (б) – распределение напряженности магнитного поля, А/м.

по переменному и постоянному току, то можно заметить, что в системе «острие-плоскость» при синусоидальном токе частотой 50 Гц наблюдается неравномерное распределение плотности тока и электромагнитного поля по сечению массивного жидкометаллического проводника. В системе «острие-острие» такого не отмечается вследствие симметрии не только относительно оси Z , но и относительно центра проводника. В ситуациях, связанных с протеканием через расплав импульсного тока, с несущей частотой

100 кГц наблюдается уже значительный скин-эффект, то есть вытеснение тока к периферии проводника. Плотность энергии в приэлектродных зонах и приэлектродные процессы выражены более существенно, если сравнить, например, рис. 3а и 7а.

Качественные картины полей течений расплава для каждого типа электродной системы существенно не изменяются от рода тока, но это, скорее всего, связано с существенной (в их формировании) ролью приэлектродных зон, а

также с тем, что векторные поля представлены нормированными векторами. Для электродной системы «острие-плоскость» характерно одно-контурное поле в центральном объеме проводника. Для электродной системы «острие-острие» наблюдается двухконтурное поле скоростей течений с двумя противонаправленными потоками в центральной части проводника, которые устремлены к центральному сечению проводника, где они сходятся, и далее жидкость движется в радиальном направлении. Турбулентность течений особенно сильно может быть выражена вблизи электродов, где напряженность электрического и магнитного полей максимальна в зонах, в которых действуют разнонаправленные силы $F_{эм}$, то есть в углах цилиндрического проводника.

Электродная система «острие-проводящие стенки» отличается от других осесимметричных систем, так как свою роль в распределении поля в такой системе должен сыграть электрод-стенка, так как электромагнитное поле будет экранироваться, и ток станет перераспределяться в проводящей стенке. Это подтверждается результатами моделирования, которые приведены на рис. 14 и 15, где все картины полей и распределений токов полностью подобны электродной системе «острие-плоскость», поэтому подробно останавливаться на них не будем. Вероятно, это связано с осесимметричностью данной системы и проводимостью электрода-стенки, которая не сильно отличается от проводимости алюминиевого расплава.

Интересным, на наш взгляд, будет анализ влияния растущих дендритов на перераспределение характеристик моделируемых полей, поскольку проводимость растущих ветвей дендритов будет иметь в 1,5–2 раза большее значение, чем проводимость жидкого металла.

Результаты влияния таких неоднородностей для режима постоянного тока для электродной системы «острие-плоскость», приведенные на рис. 16, показывают, в отличие от рис. 2, эффект перераспределения электромагнитного поля при наличии растущих дендритов в объеме расплава. Нетрудно заметить, что концентрация поля в области дендритов будет вызывать существенное перераспределение плотности тока даже в режиме постоянного тока. А значит, произойдет и перераспределение электромагнитной силы в расплаве, что приведет к изменению электрооточкового воздействия на объект обработки. То есть в первую очередь значительную роль будут играть процессы теплового и силового воздействия на растущие ветви дендритов, перераспределение же зародышей кристаллизации и нематаллических включений за счет гидродинами-

ческих воздействий существенно ослабнет, что хорошо согласуется с данными работы [7], в которой рассматриваются процессы перемешивания при магнитно-гидродинамической обработке расплавов. Полученные расчетные данные частично объясняют различные параметры обработки расплавов в интервале кристаллизации и в жидком состоянии, полученные, например, авторами работ [3, 9, 10] экспериментально. Это, конечно же, необходимо учитывать при подготовке технологии КЭТО для конкретных задач литейного производства.

Перейдем к системе параллельных электродов, которая не может быть отнесена к цилиндрической симметрии, поэтому здесь необходимо решать трехмерную задачу. Для понимания качественных характеристик процессов рассмотрим сечение в такой системе, которое проходит через оси электродов, как показано на рис. 17.

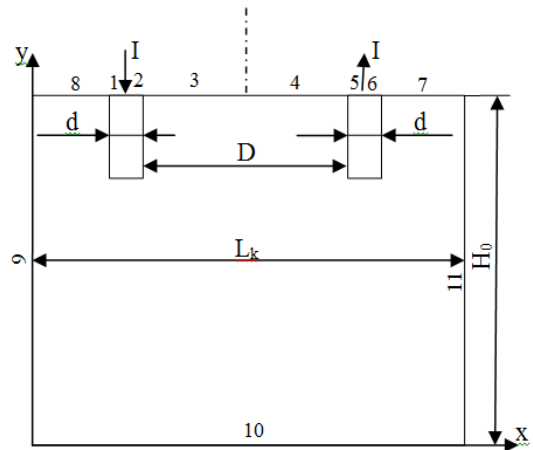


Рис. 17. Система с параллельным расположением электродов: L_k – ширина формы с расплавом, м; H_0 – высота формы, м; D – расстояние между электродами, м; d – диаметр электрода, м; область от 1 до 11 – границы, на которых задавались граничные условия для расчета.

В этом случае у магнитного поля будет одна составляющая – H_z . Для расчета примем следующие геометрические размеры, мм: $H_0 = 100$; $d = 4$; $L_k = 80$; $D = 52$.

Начальные условия:

$$H_z|_{r=0} = 0; I|_{r=0} = 0; \vec{v}|_{r=0} = 0.$$

Граничные условия, исходя из учета взаимодействия проходящих через электроды токов, сформулируем в соответствии с рис. 17:

область 1:

$$H_z = \frac{I_0 \cdot (0,012 - x)}{2 \cdot \pi \cdot d^2};$$

область 2:

$$H_z = \frac{I_0 \cdot (x - 0,012)}{2 \cdot \pi \cdot d^2};$$

области 3, 4:

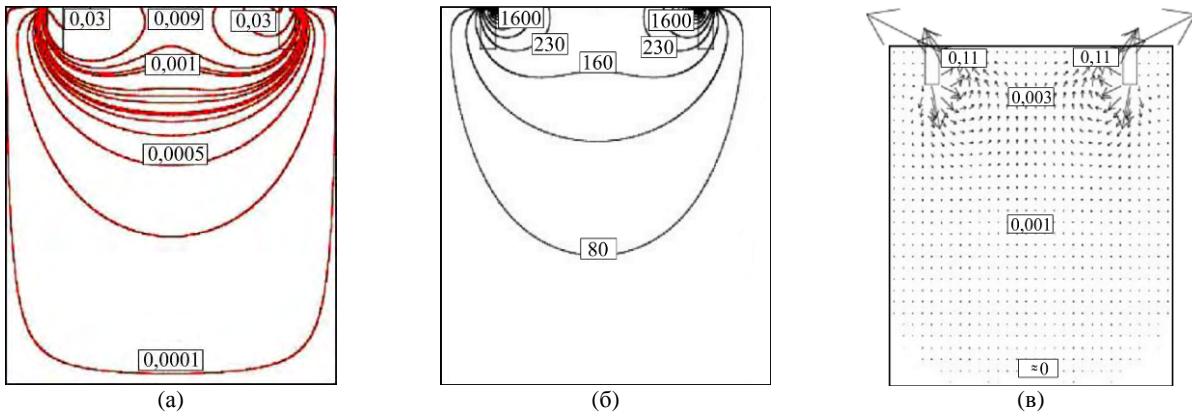


Рис. 18. Распределение электромагнитного поля и поля течений, система с параллельными электродами, режим постоянного тока: (а) – распределение напряженности электрического поля, В/м; (б) – распределение напряженности магнитного поля, А/м; (в) – распределение поля течений, м/с.

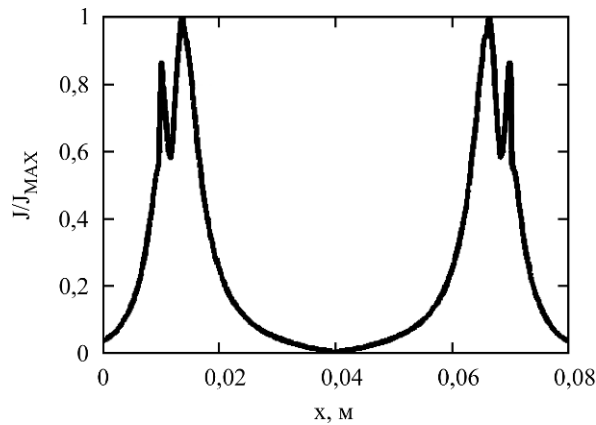


Рис. 19. Относительное распределение плотности тока на поверхности расплава, режим постоянного тока.

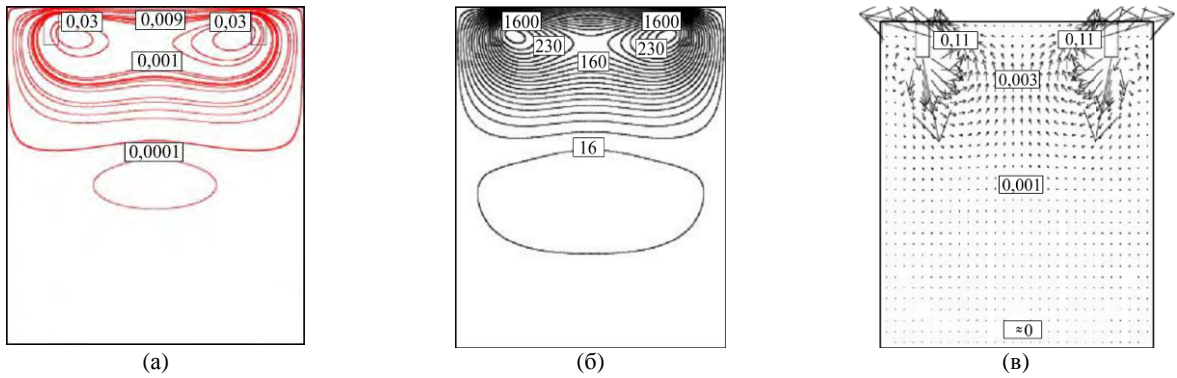


Рис. 20. Распределение электромагнитного поля и поля течений, система с параллельными электродами, режим переменного тока: (а) – распределение напряженности электрического поля, В/м; (б) – распределение напряженности магнитного поля, А/м; (в) – распределение поля течений, м/с.

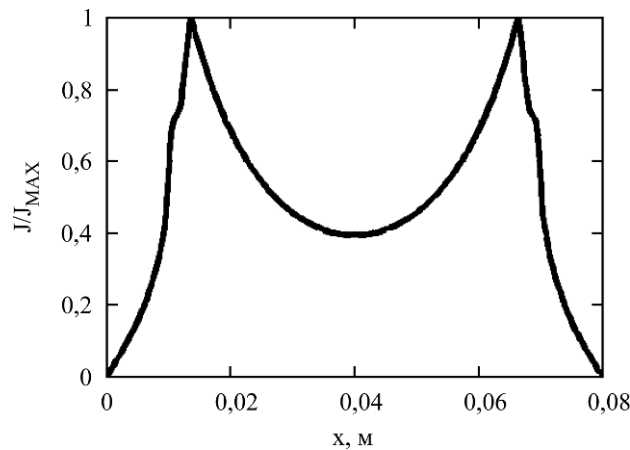


Рис. 21. Относительное распределение плотности тока на поверхности расплава, режим переменного тока.

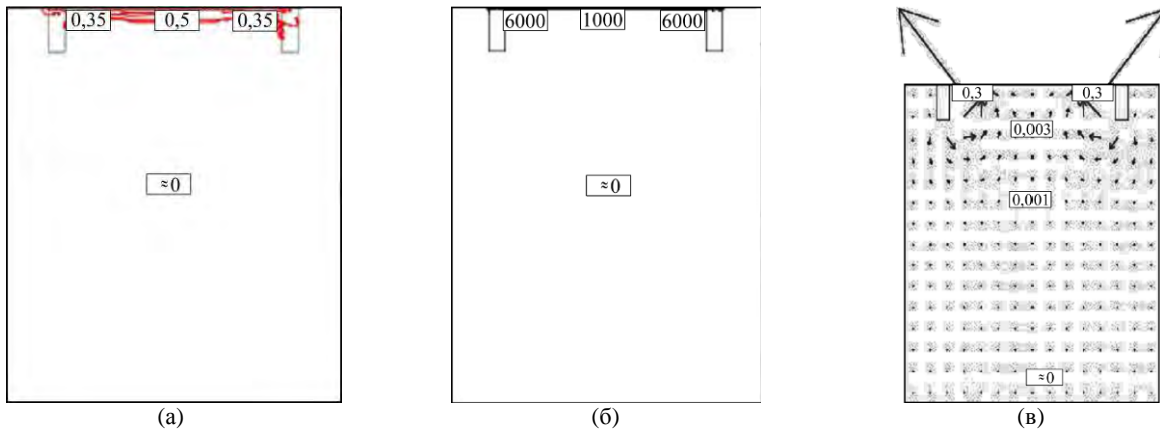


Рис. 22. Распределение электромагнитного поля и поля течений, система с параллельными электродами, режим импульсного тока: (а) – распределение напряженности электрического поля, В/м; (б) – распределение напряженности магнитного поля, А/м; (в) – распределение поля течений, м/с.

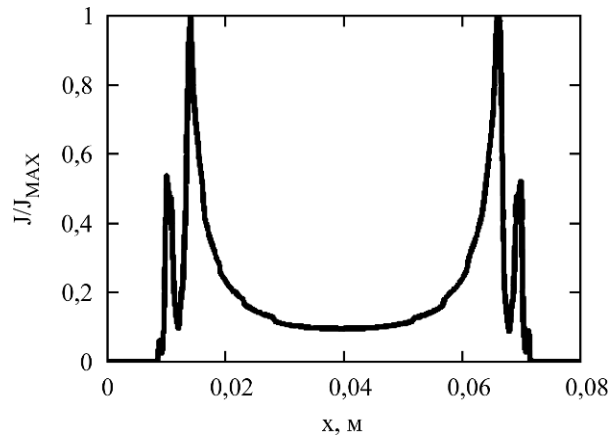


Рис. 23. Относительное распределение плотности тока на поверхности расплава.

$$H_z = \frac{I_0}{2 \cdot \pi \cdot (x - 0,012)} + \frac{I_0}{2 \cdot \pi \cdot (0,068 - x)};$$

область 5:

$$H_z = \frac{I_0 \cdot (0,068 - x)}{2 \cdot \pi \cdot d^2};$$

область 6:

$$H_z = \frac{I_0 \cdot (x - 0,068)}{2 \cdot \pi \cdot d^2};$$

области 7, 8, 9, 10, 11: $H_z \rightarrow 0$.

Результаты моделирования приведены на рис. 18–23.

Как видно из этих данных, наблюдаются схожие с осесимметричными системами основные закономерности, такие как скин-эффект электромагнитного поля и тока при переходе от постоянного поля к импульсному, схожесть поля течений для всех трех режимов тока. Однако можно отметить, что, в отличие от режима постоянного тока, переменный синусоидальный ток уже на частоте 50 Гц имеет особенности. В частности, это выражается в формировании вторичных, наведенных в объеме расплава магнитного и индуцированного полей, что естественно скажется на перераспределении плотности электромагнитной и тепловой энергии. При импульсном токе такие процессы тоже

имеют место, но вследствие многократного, на порядки превышения плотностей параметров полей в приповерхностном слое этого не видно на результатах расчетов. Поля течений здесь также имеют схожий характер, что обусловлено отталкиванием разнонаправленных токов и формированием нисходящего по периферии формы с расплавом и восходящих в ее серединной части течений. Вследствие того, что векторные поля течений нормированы, нет возможности показать их градиенты для разных режимов тока в данной постановке задачи.

Ранее в работе [11] об импульсной обработке расплава, учитывая скин-эффект тока, были введены понятия объема прямого (первоначального) воздействия и объема объекта обработки. Они показывают разницу между объемом расплава, который подвергается активному воздействию тока, и объемом всего расплава, который должен попасть в сферу активного влияния тока. Это возможно за счет «встряхиивания» расплава. Таким образом, соотношение этих объемов позволяет оценить количество импульсов, а значит, и время обработки, при котором весь объем расплава попадает в объем прямого воздействия.

Результаты данной статьи наглядно показывают неодинаковое распределение электромаг-

нитного поля и тока в объеме расплава как при разных его режимах, так и для случаев всех выбранных электродных систем. То есть объем прямого активного воздействия во всех случаях (вариантах) КЭТО отличается от объема объекта обработки. Может быть, и по этой причине, как отмечено в работе [1], результаты разных исследователей качественно и количественно отличаются для одного и того же сплава, обрабатываемого при одинаковой температуре, одинаковыми режимами тока с одинаковыми параметрами, так как не учитывался тип электродной системы.

ВЫВОДЫ

1. Показаны особенности распределения электромагнитного и гидродинамического полей при КЭТО в различных режимах и вариантах технологического исполнения. Установлено, что в зависимости от типа электродной системы и режима электрического тока в макрообъеме расплава генерируются качественно различные распределения электрических, магнитных и гидродинамических полей. Характер этих полей, определяемых как сфера влияния на расплав, должен по-разному оказывать воздействие как на кристаллизационную способность расплава, так и на процессы его твердения.

2. Особо необходимо подчеркнуть роль гидродинамических течений в расплаве, возникающих при КЭТО в разных вариантах электродных систем и режимов тока. А, как известно, роль гидродинамических течений в процессах переноса массы в расплаве более существенна, чем диффузионных процессов. Этот факт должен качественно и количественно менять результативность процессов сорбции при кристаллизации, а также активно влиять на гомогенизацию расплава.

3. Доказано, что при различных температурных диапазонах обработки расплава, а именно в жидком состоянии и при образовании и росте кристаллов, характер распределения электрического и магнитного полей существенно различается. Наблюдаются концентрация и перераспределение электрического поля в областях с различной проводимостью (жидкий металл – растущие кристаллы), изменяются приоритетные механизмы воздействия, как, например, тепловой

и гидродинамический, что также необходимо учитывать при проектировании технологии КЭТО для конкретных задач литейного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tsurkin V.N., Sinchuk A.V. and Ivanov A.V. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2011, **46**(5), 456–464.
2. Цуркин В.Н. *Процессы литья.* 2015, (5), 3–10.
3. Борисов Г.П., Цуркин В.Н., Синчук А.В., Иванов А.В. *Металлургия машиностроения.* 2010, (5), 33–39.
4. Chunyan Ban, Han Yi, Qixian Ba, Cui Jianzhong. *EPM.* 2007, (8), 34–37.
5. Yunhu Zhang, Chanjiang Song, Liang Zhu, Hongxing Zheng et al. *Metall Mater Trans B.* 2011, **42**(3), 604–611.
6. Guangming Xu, Jiawei Zheng, Yong Liu, Jianzhong Cu. *China foundry.* 2005, **2**(3), 171–175.
7. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. *Элементы численного расчета электромагнитных процессов в проводящих средах.* Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 1999. 363 с.
8. Ivanov A.V., Sinchuk A.V., Bogoslavskaya A.S. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2011, **47**(1), 28–34.
9. Ivanov A.V., Sinchuk A.V., Ruban A.S. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2012, **48**(2), 180–186.
10. Nakada M., Shiohara Y., Flemings M.C. *ISIJ Int.* 1990, **30**(1), 27–33.
11. Tsurkin V.N., Ivanov A.V., Cherepovskii S.S., Vasyanovich N.A. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2016, **52**(2), 56–61.

Поступила 12.04.17

Summary

Features of redistribution of electromagnetic and hydrodynamic fields by conductive electric current treatment in different modes and electrode system variants are showed. Mathematical modeling was used to find out that, depending on the type of an electrode system and a mode of the electric current flowing through the melt, qualitatively different configurations and distributions of electric, magnetic and hydrodynamic fields are realized in the macro-volume of the melt. Their character of distribution determines the area and the degree of impact on the processing object, which is decisive in the design of technologies for electric current treatment of melts.

Keywords: melt, electric current treatment, current modes, electrode system, field distribution.