

Особенности перераспределения электрического и теплового полей на границе раздела фаз при пропускании электрического тока через расплав

В. Н. Цуркин, А. В. Иванов

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Богоявленский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: dpta@iipr.com.ua*

В двумерной постановке методами численного эксперимента проанализированы особенности перераспределения линий однородного электрического поля в объеме металлического расплава на границе раздела наноразмерных фаз, отличающихся проводимостью от матрицы. Показано, что градиенты напряженности электрического и теплового полей определяются формой фазы и соотношением ее проводимости и проводимости матрицы. Анализируемые поверхностные эффекты также определяются расположением сектора поверхности включения относительно линий тока.

Ключевые слова: расплав, обработка электрическим током, наноразмерная частица, кристаллизационная способность, энергетические факторы.

УДК 537.311.33

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в специализированных журналах появляется все больше информации об использовании кондукционной электротоковой обработки (КЭТО) металлических расплавов в технологиях литейного производства. При этом непосредственно через расплав пропускают электрический ток в различных его режимах (постоянный, переменный, импульсный), в отличие от индуцированного в расплаве тока при наложении магнитного поля (индукционная обработка). В этих случаях различаются подходы к постановке и решению электродинамических, электрофизических и электротехнических задач. Результаты использования КЭТО однозначно показывают, что такой способ является эффективным и относительно дешевым, простым в реализации и экологически чистым инструментом для обеспечения высоких показателей качества литого металла независимо от его химического состава, способа выплавки и разлива. При этом обработку расплава проводили в печи, в промежуточной емкости и в форме [1–6].

Авторами многих публикаций отмечаются (на феноменологическом уровне) такие эффекты КЭТО, как увеличение количества зародышей кристаллизации при гомогенном и гетерогенном механизмах зародышеобразования, активизация процессов переноса и растворимости, дегазация и гомогенизация расплава. Но, к сожалению, широкое использование этого метода в промышленности, как, например, электромагнитное перемешивание или магнитогидродинамическая обработка расплава, пока ждет своего часа.

По мнению авторов данной статьи, причины этого обусловлены прежде всего недостаточным уровнем представлений о физических принципах и функциональных возможностях КЭТО изменять структуру и кристаллизационную способность объекта обработки. Набор таких данных позволил бы предложить научно обоснованные рекомендации по проектированию соответствующих высокоэффективных, энергосберегающих технологических модулей, реализующих КЭТО на разных стадиях металлургического передела в системе «шихта-расплав-отливка». В свою очередь это дало бы возможность методу КЭТО активно конкурировать на рынке литейного производства при условии оптимального соотношения «цена-качество».

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМНОЙ СИТУАЦИИ

Ключевая фундаментальная проблема литейного производства, решаемая на всех стадиях металлургического передела в системе «шихта-расплав-отливка», – это повышение показателей качества литого металла или обеспечение требуемых, соответствующих современным запросам [7]. При этом возникают различные проблемные ситуации, определение которых позволяет ставить и решать частные задачи. И уже их совокупность в той или иной мере показывает пути решения вышеупомянутой проблемы. Что касается метода КЭТО, то его, как, впрочем, и другие методы, следует отнести к категории многофакторных, многофункциональных и многоцелевых задач. При этом понимание природы функцио-

нальных возможностей КЭТО требует привлечения модельных представлений металлофизики, электрофизики, электродинамики, гидродинамики и, конечно же, термодинамики. Такая задача в полной постановке решается методами мультифизического моделирования, для которых суть важно выделить сильные и (или) слабые связи анализируемых процессов (strong coupling and (or) weak coupling) [8]. Только такой интегральный подход позволит спрогнозировать внутренние структурно-кинетические и фазовые изменения в расплаве. Но их первопричиной являются внешние структурно-формирующие параметры нагружения металлической системы. Именно их строгий учет позволит перейти к решению мультифизической задачи.

Практически во всех публикациях, рассматривающих пропускание электрического тока через расплав, в качестве такого параметра принимается или амплитудное значение тока, или его плотность. Но следует уточнить, что сферой влияния на расплав при КЭТО является не электрический ток, а электромагнитное поле, которое формируется в объекте обработки. В силу того что ток в расплав подводится электродами конечных размеров и определенной геометрии, с различными вариантами их расположения в расплаве, а также с учетом различных режимов тока, такое поле на макроуровне нельзя назвать однородным [1, 9, 10]. Но расплав не является системой, состоящей из однородной механической смеси атомов как на микро-, субмикро-, мезо-, так и атомарном уровнях структуры за счет наличия в нем нерастворенных и(или) нерастворимых фаз разных размеров и различного химического состава, а также из-за микронеродного строения жидкометаллической системы, определяемой как совокупность относительно упорядоченных кластеров, разделяемых разупорядоченными областями. Формируемые в расплаве зародыши кристаллизации, как правило, также вносят свою лепту в степень неоднородности расплава на соответствующем уровне его структуры. Такие локальные образования при наличии разницы их проводимости с проводимостью матрицы также должны дополнительно локально искривлять потенциалы электрического поля макроуровня. Это, безусловно, может вносить существенный вклад в изменение термодинамической обстановки в расплаве при его кристаллизации и последующем твердении. В ситуации, свободной от какого-либо внешнего воздействия, то есть в условиях естественной кристаллизации, пользуясь понятиями свободной энергии Гиббса, плотности поверхностной энергии на границе раздела фаз, энергии активации процессов переноса, сорбции и переохлаждения, можно

спрогнозировать возможные механизмы и результаты кристаллизации [11–13]. Но при наложении электрического поля, характеристики которого учтены не только на макроуровне, но и на иных уровнях структуры, энергетические параметры такого процесса кристаллизации должны корректироваться.

Не претендуя на полное решение такой задачи, но и не снижая ее общности, определим *цель работы*: показать методами численного моделирования характер и параметры перераспределения электрического и теплового полей в жидкометаллической системе на частицах (фазах), интерпретируемых по характерному размеру и проводимости как зародыши кристаллизации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для определения особенностей распределения электрического и теплового полей на границе раздела фаз в жидкометаллическом проводнике достаточно в первой постановке ограничиться моделированием ситуации, когда модельная частица находится в сфере влияния электрического поля и имеет проводимость $\sigma_{вкл}$, которая больше или меньше проводимости расплава $\sigma_{распл}$. Ограничимся размером частицы порядка 10^{-8} м, что соответствует характерному размеру зародыша при гомогенной кристаллизации, например до- и заэвтектического силумина, а также возможному размеру подложки при гетерогенной кристаллизации [11, 12]. Сопоставляя размер частицы с возможными градиентами плотности тока при разных его режимах [10], ограничимся в первом приближении рассмотрением ситуации, когда частица присутствует в однородном электрическом поле. Рассмотрим единичную частицу, исключая эффекты ее взаимодействия с другими частицами, что существенно усложнило бы вычисления. Достаточно информативным в рамках данной задачи будет ее рассмотрение в двумерной постановке.

Геометрическая модель такой задачи представлена на рис. 1. Здесь 1–4 – границы рассматриваемой области.

Используя приведенные выше допущения, чтобы определить распределение плотности тока, напряженность электрического поля и удельную мощность тепловыделения в режиме постоянного тока, необходимо решить несколько довольно простых уравнений [3, 10]. Для определения скалярного электрического потенциала (ϕ):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = 0, \quad (1)$$

где σ – удельная электрическая проводимость материала, См/м.

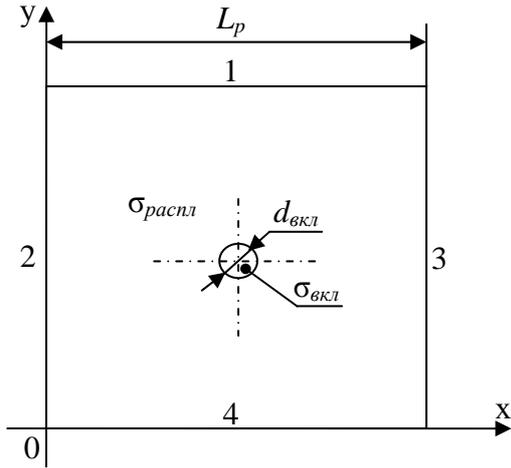


Рис. 1. Геометрическая модель задачи электротокowego воздействия на частицу, находящуюся в матрице расплава.

Для определения плотности тока (J):

$$\vec{J} = -\sigma \nabla \varphi. \quad (2)$$

Для определения напряженности электрического поля (E):

$$\vec{J} = -\sigma \vec{E}. \quad (3)$$

Тогда удельную мощность тепловыделения (q) определяем выражением:

$$q = |\vec{J}|^2 / \sigma, \quad (4)$$

где $|\vec{J}| = \sqrt{J_x^2 + J_y^2}$ – модуль вектора плотности тока; $J_x = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial x}$ и $J_y = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial y}$ – компоненты вектора плотности тока соответственно.

Поскольку задача стационарная, то начальное условие будет иметь вид: $J = J_0|_{t=0} = \text{const}$, где J_0 – задаваемая плотность тока.

Граничными условиями для областей 1–4 (рис. 1) будут выражения:

- область 1: $\vec{n} \cdot \vec{J} = 0$;
- область 2: $\vec{n} \cdot \vec{J} = \vec{n} \cdot J_0$;
- область 3: $\vec{n} \cdot \vec{J} = \vec{n} \cdot J_0$;
- область 4: $\vec{n} \cdot \vec{J} = 0$.

Уравнения (1–4) решали методом конечных элементов в системе Comsol с соответствующими граничными и начальными условиями.

Зададимся исходными данными для расчета: вариант 1 (проводящее включение): $L_p = 1 \cdot 10^{-7}$ м; $d_{\text{вкл}} = 1 \cdot 10^{-8}$ м; $\sigma_{\text{распл}} = 3,8 \cdot 10^6$ См/м; $\sigma_{\text{вкл}} = 9,5 \cdot 10^6$ См/м; вариант 2 (непроводящее включение): $L_p = 1 \cdot 10^{-7}$ м; $d_{\text{вкл}} = 1 \cdot 10^{-8}$ м; $\sigma_{\text{распл}} = 3,8 \cdot 10^6$ См/м; $\sigma_{\text{вкл}} = 4 \cdot 10^{-4}$ См/м.

Значение J_0 оценим исходя из выражения:

$$J_0 = I_A / L_p^2, \quad (5)$$

где силу тока (I_A) примем равной 10 А.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ИХ АНАЛИЗ

Результаты решения уравнений (1–4) для круглой частицы представлены на рис. 2–4 для варианта 1 и на рис. 5–7 – для варианта 2.

Приведенные на рис. 2–13 данные свидетельствуют, что логично, о существенном влиянии формы и проводимости частицы на характер перераспределения электрического и теплового полей в области «частица-расплав». При наличии проводящей частицы наблюдаются ослабление электрического поля внутри ее объема и скачок потенциала на ее границах. Это обуславливает характерное резкое увеличение на 50% тепловой мощности на границах, ориентированных вдоль направления электрического тока, и такое же скачкообразное уменьшение на 60% на границах, перпендикулярных направлению токовых линий. В связи с тем что электрическое поле проникает в проводящую частицу, тепловая мощность (≈ 25 –30% для данного случая) выделяется и внутри ее объема пропорционально $\sigma_{\text{вкл}}/\sigma_{\text{распл}}$. Практически не проникая в непроводящую частицу, электрическое поле обуславливает характерный скачок напряженности поля и соответственно удельной мощности тепловыделения на границах, перпендикулярных линиям тока, на 70% для круглой частицы и на 50% в области середины грани кубического включения, но практически уменьшает его до нуля на границах, расположенных вдоль направления протекания тока.

Следует также обратить внимание на пространственное распределение исследуемых характеристик в приграничной с частицей области. Как известно [12, 13], на граничной поверхности с точки зрения термодинамики не наблюдается скачкообразного перехода одной фазы в другую. Приповерхностная область по Гиббсу в математическом представлении имеет объем, равный нулю. По Гугенхайму он учитывается некой толщиной, в которой происходит «формирование» поверхностной энергии, величина этой толщины составляет несколько ангстрем. Эти подходы в том числе отличают математическое описание работы, идущей на образование поверхности раздела фаз. Как видно из представленных на рис. 2–13 графиков, размер переходной зоны, в которой происходит перераспределение анализируемых характеристик, составляет величину, равную примерно $2d_{\text{вкл}}$, что на два порядка больше толщины переходного слоя, «формирующего» поверхностную энергию. Таким образом, электрическое поле при КЭТО изменяет термодинамическую обстановку вблизи частицы, а значит, и кристаллизационную способность расплава, внося определенные

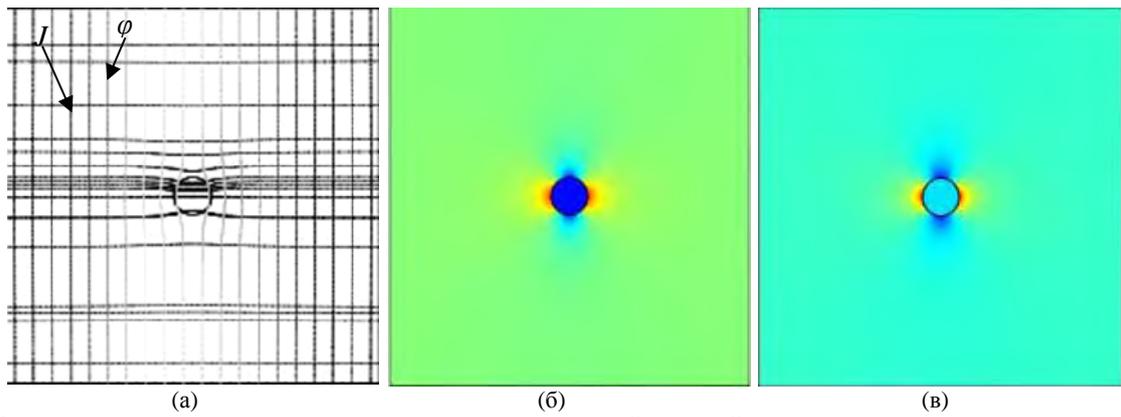


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля, удельной тепловой мощности, плотности тока и электрического потенциала (круглая проводящая частица): (а) – линии электрического потенциала и тока; (б) – распределение напряженности электрического поля; (в) – распределение удельной мощности тепловыделения.

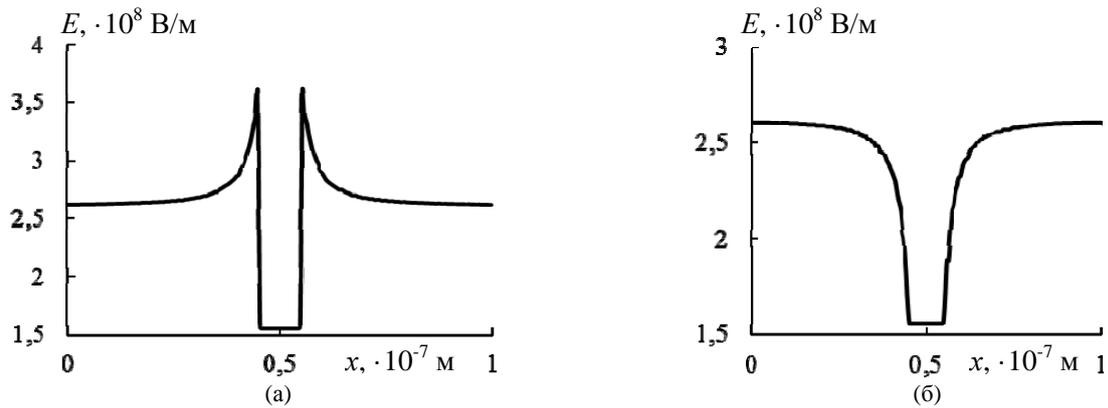


Рис. 3. Числовое распределение напряженности электрического поля в срединных сечениях, проходящих через области 2–3 (а) и 1–4 (б) (круглая проводящая частица).

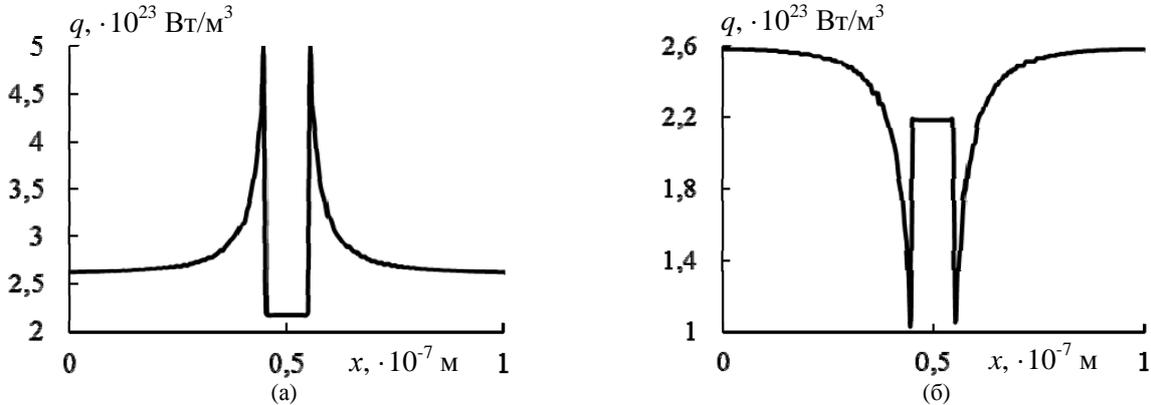


Рис. 4. Числовое распределение удельной тепловой мощности в срединных сечениях, проходящих через области 2–3 (а), 1–4 (б) (круглая проводящая частица).

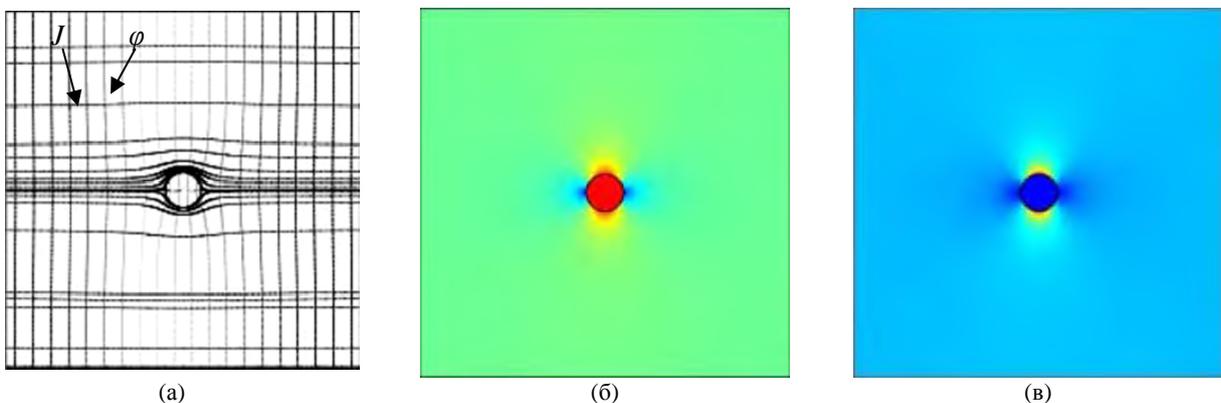


Рис. 5. Распределение напряженности электрического поля, удельной тепловой мощности, плотности тока и электрического потенциала (круглая непроводящая частица): (а) – линии электрического потенциала и тока; (б) – распределение напряженности электрического поля; (в) – распределение удельной мощности тепловыделения.

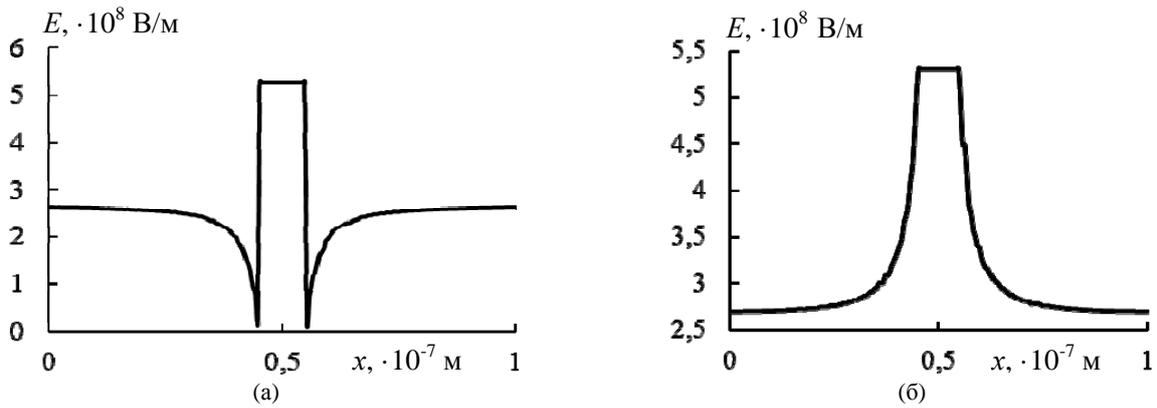


Рис. 6. Числовое распределение напряженности электрического поля в срединных сечениях, проходящих через области 2–3 (а), 1–4 (б) (круглая непроводящая частица).

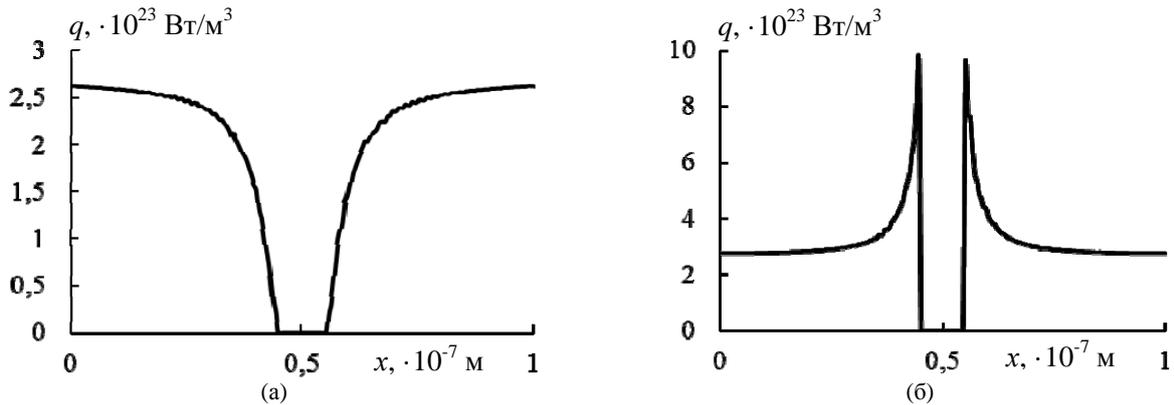


Рис. 7. Числовое распределение удельной тепловой мощности в срединных сечениях, проходящих через области 2–3 (а), 1–4 (б) (круглая непроводящая частица).

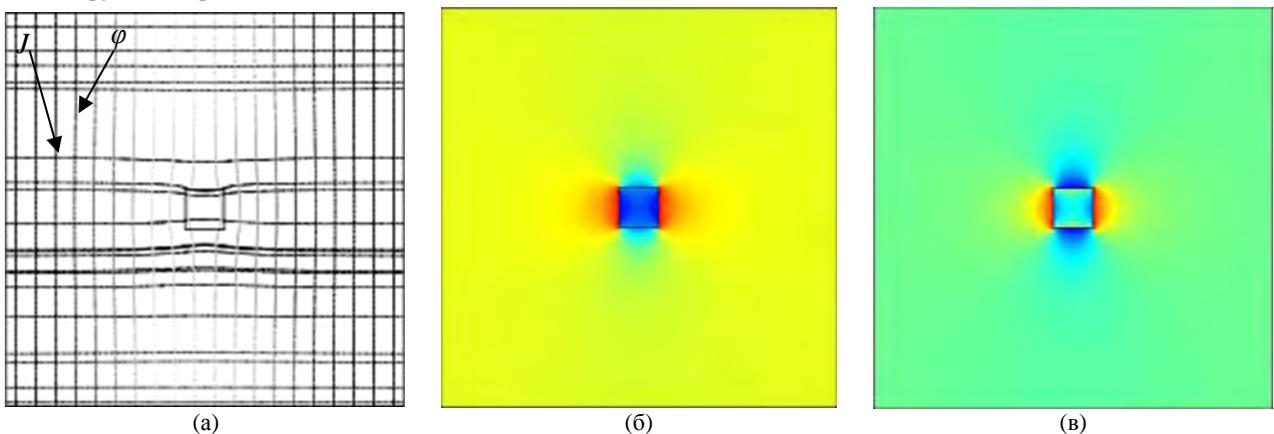


Рис. 8. Распределение напряженности электрического поля, удельной тепловой мощности, плотности тока и электрического потенциала (кубическая проводящая частица): (а) – линии электрического потенциала и тока; (б) – распределение напряженности электрического поля; (в) – распределение удельной мощности тепловыделения.

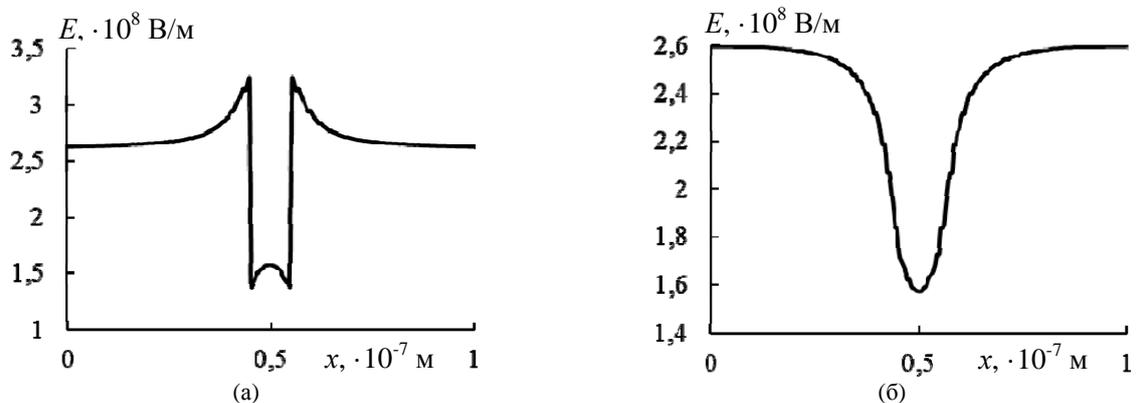


Рис. 9. Числовое распределение напряженности электрического поля в срединных сечениях, проходящих через области 2–3 (а), 1–4 (б) (кубическая проводящая частица).

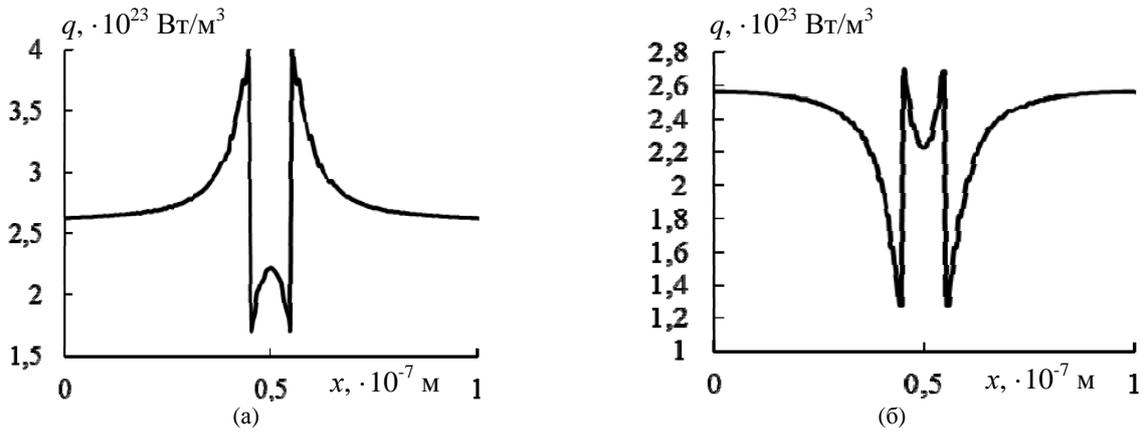


Рис. 10. Числовое распределение удельной тепловой мощности в срединных сечениях, проходящих через области 2–3 (а), 1–4 (б) (кубическая проводящая частица).

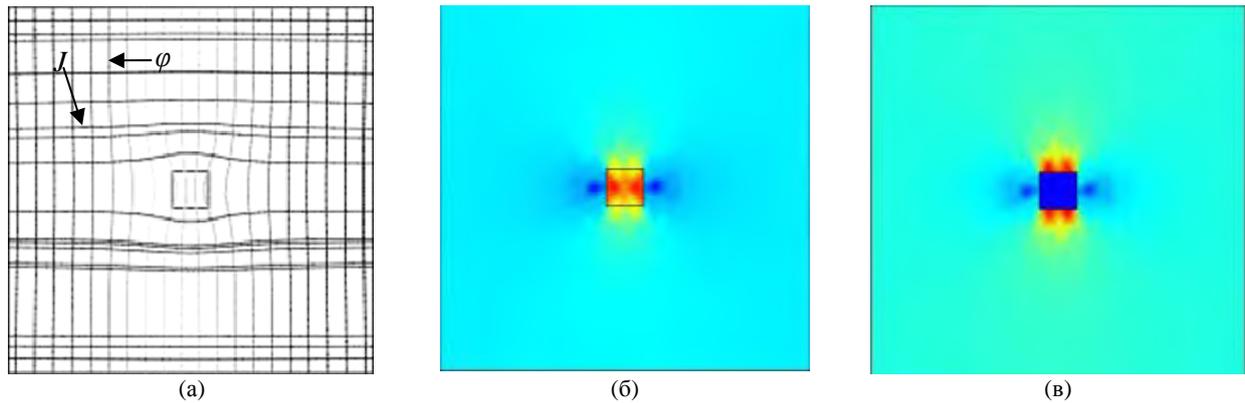


Рис. 11. Распределение напряженности электрического поля, удельной тепловой мощности, плотности тока и электрического потенциала (кубическая непроводящая частица): (а) – линии электрического потенциала и тока; (б) – распределение напряженности электрического поля; (в) – распределение удельной мощности тепловыделения.

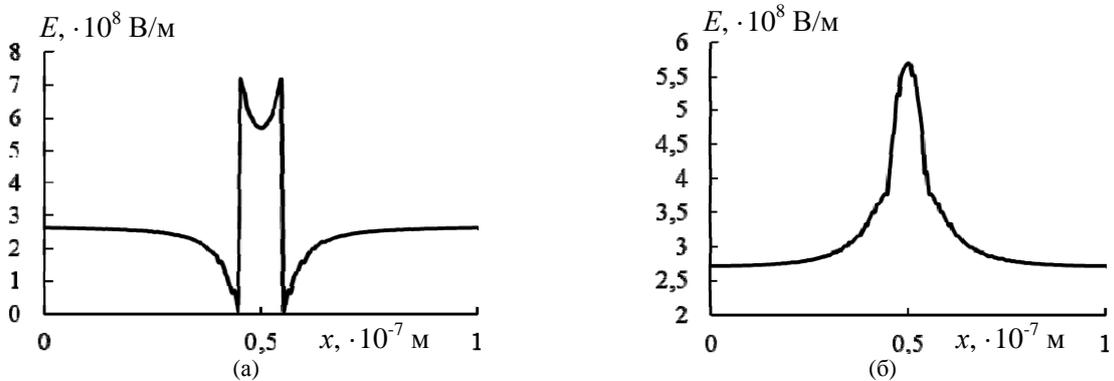


Рис. 12. Числовое распределение напряженности электрического поля в срединных сечениях, проходящих через области 2–3 (а), 1–4 (б) (кубическая непроводящая частица).

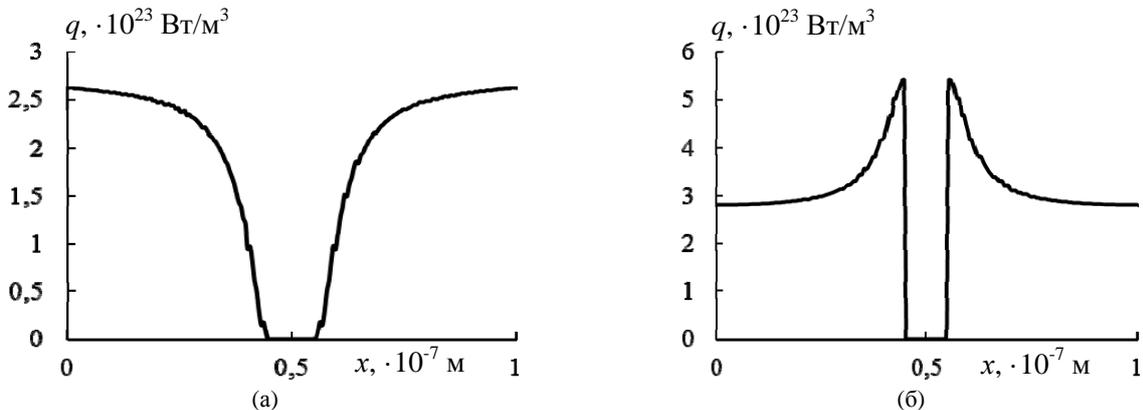


Рис. 13. Числовое распределение удельной тепловой мощности в срединных сечениях, проходящих через области 2–3 (а), 1–4 (б) (кубическая непроводящая частица).

коррективы в ее движущую силу, – химический потенциал, величина и знак которого в разных секторах поверхности частицы будут разными в зависимости от ориентации этого сектора относительно потенциальных линий тока.

ВЫВОДЫ

1. Методами численного моделирования условий кристаллизации расплава, подвергаемого воздействию электрического тока, определены характер пространственного распределения электрического поля и поля тепловой мощности на единичных частицах, интерпретируемых по характерному размеру и проводимости как зародыши кристаллизации. Установлено, что его параметры качественно и количественно зависят от формы частицы и соотношения ее проводимости с проводимостью расплава, а также от ориентации сектора поверхности частицы относительно линий тока.

2. Основываясь на результатах численного моделирования, предложена рабочая гипотеза изменения химического потенциала в области частицы, а значит, и кристаллизационной способности всего расплава.

3. Регулировать величины градиентов напряженности электрического поля и тепловой мощности в приповерхностной зоне частицы и в ее объеме можно изменением характеристик пропускаемого тока.

4. Предложенный алгоритм решения поставленной задачи может быть использован для анализа подобной электрофизической ситуации в случаях наличия ансамбля частиц различной формы, проводимости и размера.

5. Полученные в данной работе результаты могут послужить основой для решения термодинамической задачи, анализирующей образование и рост кристаллов при протекании через расплав электрического тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цуркин В.Н., Синчук А.В., Иванов А.В. *ЭОМ*. 2011, (5), 89–98.
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. Chun Yan Ban, Yi Han, Qi Xian Ba, Jian Zhong Cui. *Mater Sci Forum*. 2007, **546–549**, 723–728.
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. Цуркин В.Н. *Металл и литье Украины*. 2008, (9), 25–28.
8. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. *Технічна електродинаміка*. 2015, (2), 3–15.
9. Ivanov A.V., Sinchuk A.V., Bogoslavskaya. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2011, **47**(1), 28–34.
10. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Д. *Элементы теории и численного расчета электромагнитных процессов в проводящих средах*. Киев: Изд. Института электродинамики НАН Украины. 1999. 363 с.
11. Ефимов В.А. *Разливка и кристаллизация стали*. М.: Metallurgia, 1976. 450 с.
12. Миссол В. *Поверхностная энергия раздела фаз в металлах*. Пер. с польск., М., 1978. 176 с.
13. Гиббс Дж.В. *Термодинамика. Статистическая механика*. М.: Наука, 1982. 584 с.

Поступила 30.11.16

После доработки 10.03.17

Summary

The two-dimensional formulation and the methods of numerical experiments were used to analyze the peculiarities of the redistribution of lines of a uniform electric field in the volume of molten metal at the interface of nano-sized phases with conductivity different from that of the matrix. It was shown that the gradients of the electric and thermal fields are determined by the shape of the phase and the ratio of its conductivity and of that of the matrix. The analyzed surface effects are also determined by the location sector of the inclusion of the surface relative to the flow lines.

Keywords: melt, electric current treatment, nano-sized particle, crystallization ability, energy factors.