

Исследование влияния приграничных зон фаз разной проводимости на распределение электрического и теплового полей при протекании электрического тока через расплав

* А. В. Иванов, ** В. Н. Цуркин

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, 54018, Украина, *e-mail: Ivanov.A.V@nas.gov.ua; **e-mail: Tsurkin@nas.gov.ua*

Поступила 19.02.2019

После доработки 15.08.2019

Принята к публикации 21.08.2019

Методами численного моделирования исследованы электрофизические эффекты в пограничных зонах фаз, которые формируются вследствие прохождения электрического тока через объем металлического расплава с включениями проводимости отличной от проводимости матрицы. Показана возможность изменения кристаллизационных стимулов жидкометаллической системы, подвергаемой обработке электрическим током. Установлены качественные и количественные закономерности в процессах формирования поверхностных эффектов на границах фаз. Это обусловлено их ориентацией относительно линий тока и разной проводимостью фазы и матрицы. Такое электротокое воздействие изменяет у растущих фаз форму, размер и ориентацию в расплаве.

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

УДК 537.311.33

DOI: 10.5281/zenodo.3522277

ВВЕДЕНИЕ

Исследование процессов в расплаве на микро- и наноразмерах для прогнозирования последствий реагентной или энергетической обработки является актуальной научно-технической задачей. Результаты ее решения позволят развить научные представления о механизмах кристаллизации и твердения сплавов, подверженных различным методам обработки. Не является исключением и метод кондукционной электро-токовой обработки (КЭТО) металлических расплавов, который в последние годы активно используется в технологиях литейного производства [1–10]. Этот энергетический метод обработки обладает широкими функциональными возможностями [1, 2, 8, 9].

Как показано в различных источниках, после его применения изменяется ход кристаллизационных процессов, повышается качество литого металла. Но, как отмечалось в работе [10], уровень представлений о взаимосвязях физических принципов, механизмах и функциональных возможностях КЭТО влиять на структуру и кристаллизационную способность объекта обработки является недостаточным. В данной работе методами численного эксперимента определен характер пространственного распределения электрического поля и поля тепловой мощности на частицах, интерпретируемых по характерному размеру и проводимости как зародыши кристаллизации. Полученные при этом результаты в совокупности с данными

ранней работы [10] могут послужить основой для решения термодинамической задачи, анализирующей образование и рост кристаллов при протекании через расплав электрического тока. Развитием этих исследований является анализ подобной электрофизической ситуации в случаях наличия ансамбля частиц различной формы, проводимости и размера.

Цель данной работы: численно показать влияние электрофизических процессов, возникающих при прохождении электрического тока в металлическом расплаве, на формирование в приграничных зонах образующихся фаз термодинамического воздействия, которое изменяет их кристаллизационные стимулы и морфологию.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для определения особенностей распределения электрического и теплового полей на границе раздела фаз в жидкометаллическом расплаве ограничимся, как и в работе [10], моделированием ситуации, когда модельные частицы, интерпретируемые как зарождающиеся или растущие фазы, находятся в сфере влияния электрического поля и имеют проводимость $\sigma_{\text{вкл}}$, которая больше или меньше проводимости расплава $\sigma_{\text{распл}}$. Ограничимся масштабом размеров частиц порядка 10 нм, что соответствует характерным размерам как зародышей кристаллизации, например до- и заэвтектического силумина, так и возможному размеру подложки при гетерогенной кристаллизации или

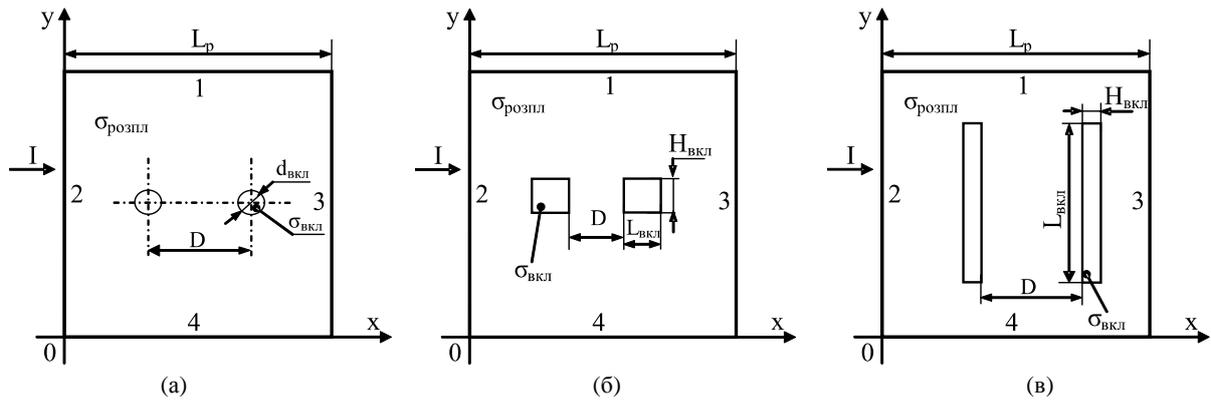


Рис. 1. Геометрическая модель задачи электротеплового воздействия на частицу, находящуюся в матрице расплава: (а) – круглые включения; (б) – кубические включения; (в) – «плоские» включения.

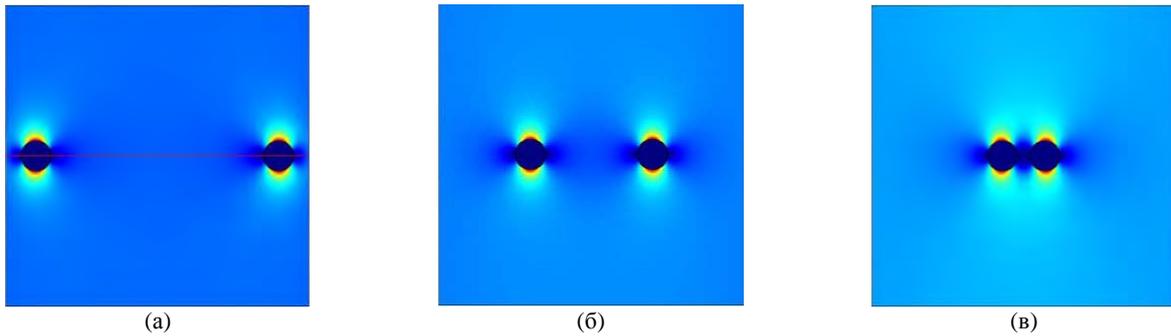


Рис. 2. Качественное распределение удельной тепловой мощности (круглые непроводящие частицы): (а) – расстояние между включениями $6d_{\text{вкл}}$; (б) – расстояние между включениями $3d_{\text{вкл}}$; (в) – расстояние между включениями менее $d_{\text{вкл}}$.

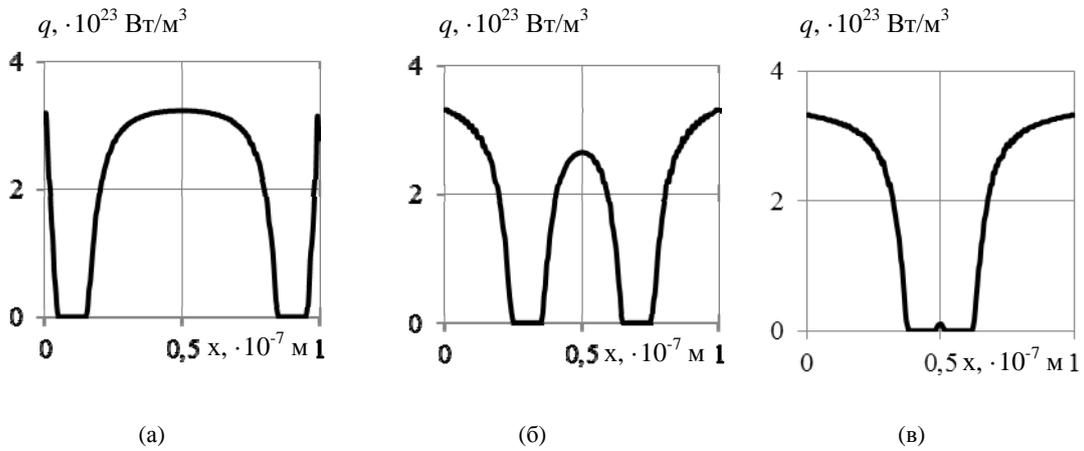


Рис. 3. Числовое распределение удельной тепловой мощности (круглые непроводящие частицы): (а) – расстояние между включениями $6d_{\text{вкл}}$; (б) – расстояние между включениями $3d_{\text{вкл}}$; (в) – расстояние между включениями менее $d_{\text{вкл}}$.

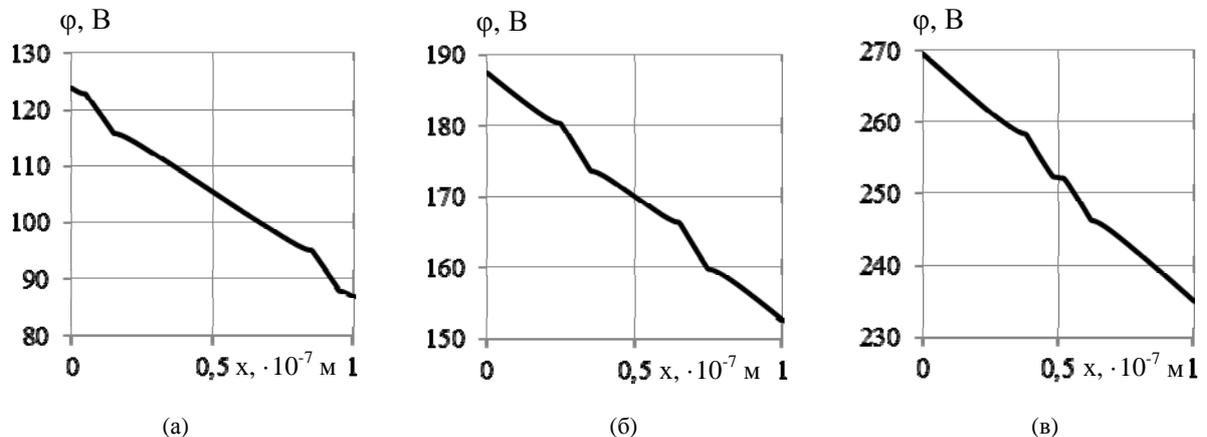


Рис. 4. Числовое распределение электрического потенциала (круглые непроводящие частицы): (а) – расстояние между включениями $6d_{\text{вкл}}$; (б) – расстояние между включениями $3d_{\text{вкл}}$; (в) – расстояние между включениями менее $d_{\text{вкл}}$.

изначальному размеру зародыша интерметаллида Fe. По тем же соображениям относительно режимов тока, которые были приняты в работе [10], ограничимся ситуацией, когда частица присутствует изначально в однородном электрическом поле. По нашему мнению, на данном этапе в рамках поставленной задачи достаточным будет ее рассмотрение в двумерной постановке.

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

Напряженность электрического поля, распределение плотности тока и удельную мощность тепловыделения определяем путем решения системы уравнений [11] для:

– скалярного электрического потенциала (φ):

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

– плотности электрического тока (J):

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

– напряженности электрического поля (E):

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

– удельной мощности тепловыделения (q):

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

где σ – удельная электрическая проводимость материала, См/м; $|\vec{J}| = \sqrt{J_x^2 + J_y^2}$ – 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 и 4 (рис. 1) будет $\vec{n} \cdot \vec{J} = 0$; для областей 2 и 3 – выражение $\vec{n} \cdot \vec{J} = \vec{n} \cdot J_0$.

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

Зададим исходными данными для расчета: вариант 1 (проводящее включение): $L_p = 1 \cdot 10^{-7}$ 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; $\sigma_{\text{распл}} = 3,8 \cdot 10^6$ См/м; $\sigma_{\text{вкл}} = 4 \cdot 10^4$ См/м. Размеры круглых и кубических включений $d_{\text{вкл}} = L_{\text{вкл}} = H_{\text{вкл}} = 1 \cdot 10^{-8}$ м; плоских в рассматриваемом сечении $L_{\text{вкл}} = 4 \cdot 10^{-8}$ м; $H_{\text{вкл}} = 0,25 \cdot 10^{-8}$ м.

Результаты моделирования полей при наличии двух частиц, находящихся на разном

расстоянии в заданном микрообъеме, представлены на рис. 2–7.

На рис. 2–7 отчетливо видно, как с уменьшением расстояния между включениями уменьшается энергетический барьер, то есть dq/dx и $d\varphi/dx$ стремятся к 0. Таким образом, показана потенциальная возможность агломерироваться круглым и кубическим включениям, расположенным на расстоянии меньше, чем $D = 2d_{\text{вкл}}$. Этот результат дополняет ранее полученные в работе [10] данные и гипотезу о размере переходной зоны, которая играет роль энергетического барьера и при ее размере примерно $2d_{\text{вкл}}$ исчезают препятствия для агломерации включений.

Далее была исследована ситуация, когда в выделенном нами микрообъеме содержится несколько частиц. Полное решение такой задачи встречает определенные вычислительные трудности. Поэтому сделаем следующие упрощения:

– расстояние от частиц до границы расчетной области не менее $d_{\text{вкл}}$;

– не будет учитываться возникновение вторичных электромагнитных процессов, которые неизбежно возникают при существенных искажениях поля на многих границах раздела фаз и микронеоднородностях даже при прохождении постоянного тока.

Рассмотрим несколько возможных вариантов сценариев:

- а) все частицы проводящие (см. рис. 8а);
- б) все частицы непроводящие (см. рис. 8б);
- в) кубические частицы непроводящие, круглые – проводящие (см. рис. 8в).

Из полученной на рис. 8, а картины распределения тепловой мощности при наличии только проводящих включений видно, что происходит разогрев базового расплава в приграничных зонах, ориентированных перпендикулярно направлению вектора плотности тока (J). При этом приграничные зоны в направлении, параллельном (J), охлаждаются. В случае непроводящих включений (рис. 8б) происходит нагрев собственно самой границы раздела фаз в направлении вектора плотности тока или же в точечных зонах микронеоднородностей. В случае же комбинации включений (рис. 8в) осуществляется нагрев в точечных зонах микронеоднородностей и базового расплава между включениями вдоль направления вектора плотности тока. На рис. 9 и 10 представлены картины электрического и теплового полей для включения типа «плоскость», из которых можно заключить, что менее проводящая, более вытянутая частица будет деформировать линии тока и электрического поля, подогреваться с торцов и стараться

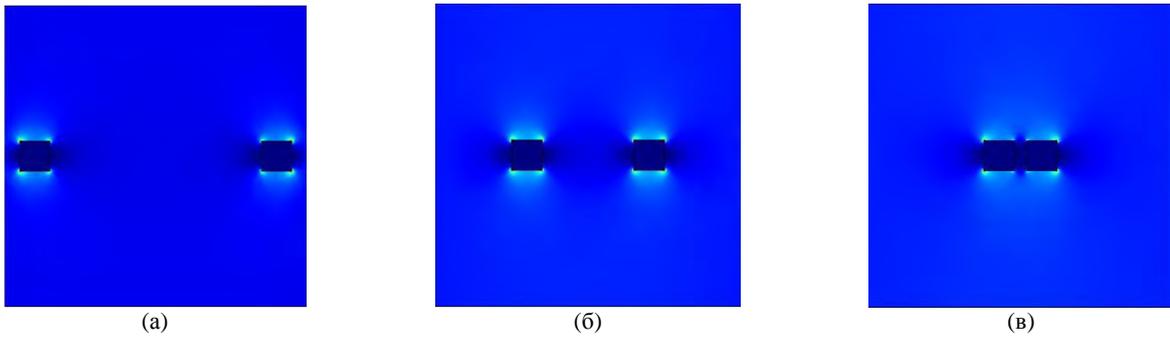


Рис. 5. Качественное распределение удельной тепловой мощности (кубические непроводящие частицы): (а) – расстояние между включениями $6d_{\text{вкл}}$; (б) – расстояние между включениями $3d_{\text{вкл}}$; (в) – расстояние между включениями менее $d_{\text{вкл}}$.

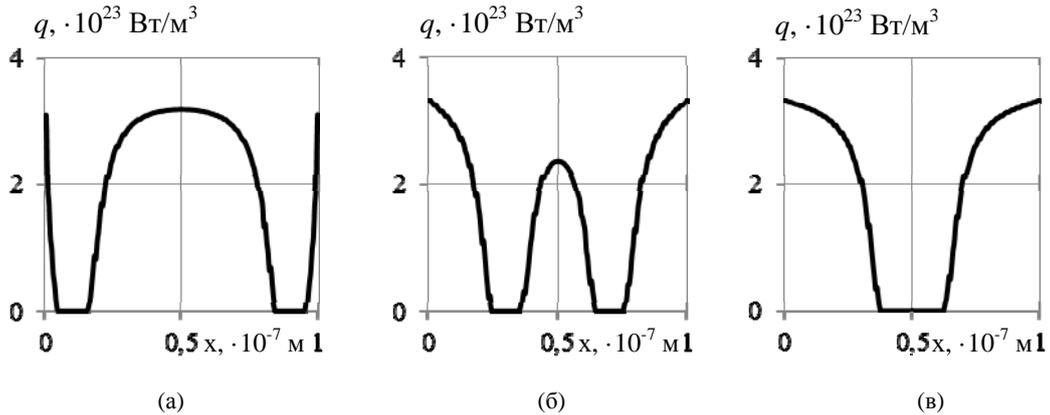


Рис. 6. Числовое распределение удельной тепловой мощности (кубические непроводящие частицы): (а) – расстояние между включениями $6d_{\text{вкл}}$; (б) – расстояние между включениями $3d_{\text{вкл}}$; (в) – расстояние между включениями менее $d_{\text{вкл}}$.

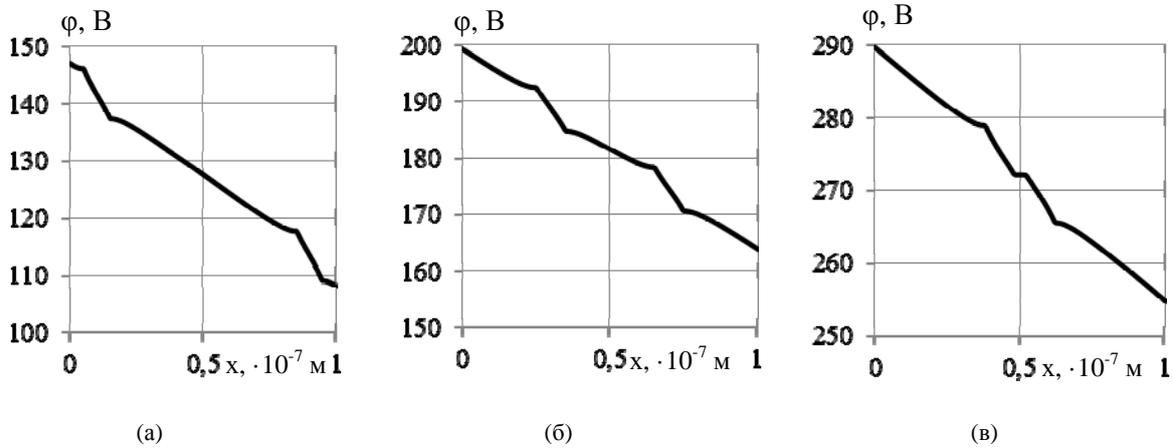


Рис. 7. Числовое распределение электрического потенциала (кубические непроводящие частицы): (а) – расстояние между включениями $6d_{\text{вкл}}$; (б) – расстояние между включениями $3d_{\text{вкл}}$; (в) – расстояние между включениями менее $d_{\text{вкл}}$.

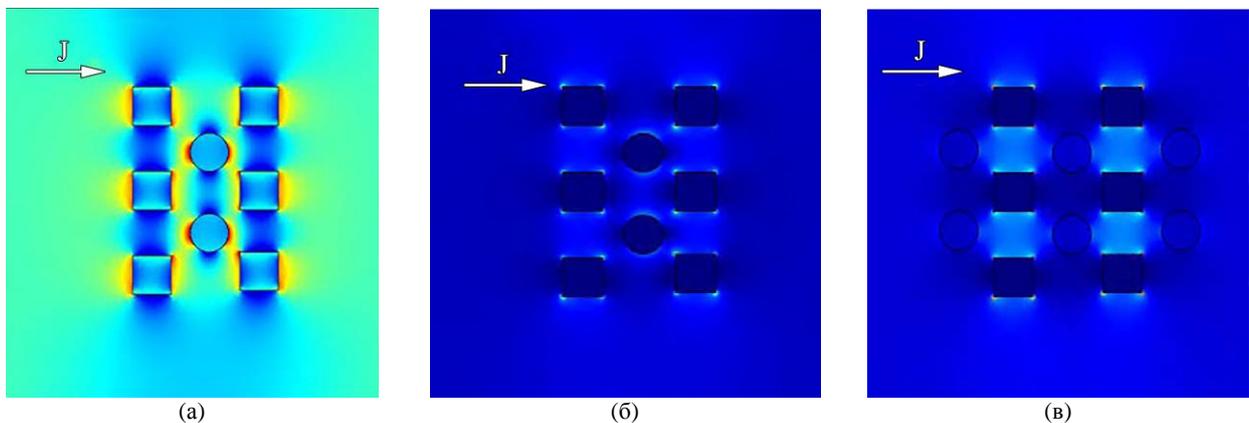


Рис. 8. Качественное распределение тепловой мощности при наличии ансамбля частиц в микрообъеме расплава: (а) все частицы проводящие (см. рис. 8а); (б) все частицы непроводящие (см. рис. 8б); в) кубические частицы непроводящие, круглые – проводящие (см. рис. 8в).

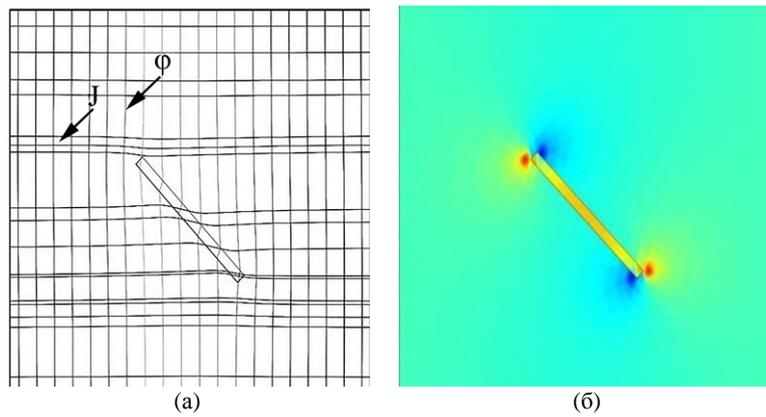


Рис. 9. Качественное распределение плотности тока и электрического потенциала (а), удельной тепловой мощности (б) при проводимости включения типа «плоскость» больше проводимости матрицы.

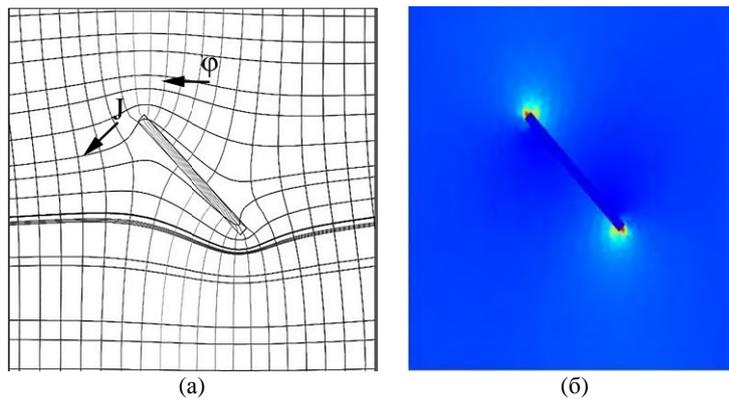


Рис. 10. Качественное распределение плотности тока и электрического потенциала (а), удельной тепловой мощности (б) при проводимости включения типа «плоскость» меньше проводимости матрицы.

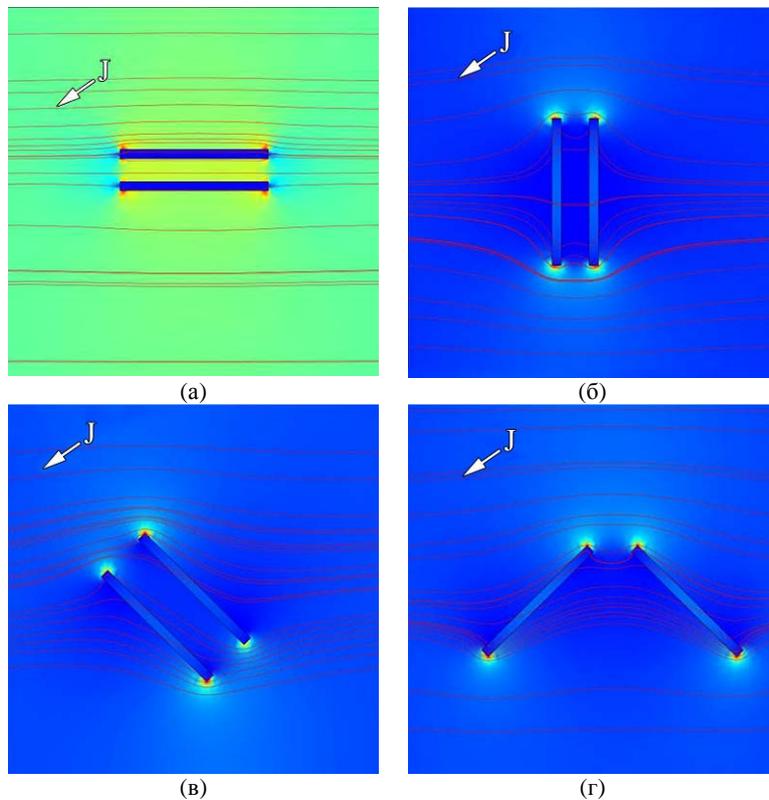


Рис. 11. Качественное распределение удельной тепловой мощности на границах раздела фаз сформированными включениями типа «плоскость» при различной их ориентации относительно линий вектора плотности тока (J): (а) – расположение включений в микрообъеме вдоль линий вектора плотности тока; (б) – перпендикулярно линиям вектора плотности тока; (в) – под одинаковыми углами к линиям вектора плотности тока; (г) – под разными углами к линиям вектора плотности тока.

принять более компактную форму. Более проводящая будет прогреваться в середине и, вероятнее всего, также будет компактироваться, но стремиться расти в разных направлениях или вообще разрушаться.

Рассмотрим различные варианты размещения двух плоских включений относительно друг друга (рис. 11). Исследуем фазу $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$. Ее проводимость меньше проводимости базового расплава. Процессы ее роста и формирования имеют большое прикладное значение. Из приведенных на рис. 11 данных видно, что ориентация в пространстве включений типа «плоскость» относительно линий вектора плотности тока или же силовых линий электрического поля может приводить к более интенсивному термосиловому воздействию на такое включение, чем для кубических или круглых. В силу того что включение «плоское» и соответственно площадь большей стороны включения много больше площади меньшей стороны, ее ориентация относительно направления вектора плотности тока имеет более интенсивное влияние на формирование тепловых полей как в базовом расплаве, так и в самих включениях. Это, в конечном итоге, повлияет на потенциальные возможности изменения фактора формы включений, их агломерацию и механизмы формирования центров кристаллизации β -фазы железа и ее роста.

ВЫВОДЫ

1. Методами численного моделирования исследовано влияние границ раздела фаз, образующихся вследствие формирования двух и более включений с проводимостью, отличной от проводимости матрицы, на пространственное распределение электрического поля в объеме металлического расплава.

2. Установлены качественные и количественные закономерности процессов формирования поверхностных эффектов на границах раздела фаз, приводящих к изменению формы, размера и ориентации в расплаве включений, в зависимости от их проводимости и расположения относительно линий тока.

3. Величина градиентов напряженности электрического поля и тепловой мощности в зоне раздела фаз существенно зависит от ее ориентации относительно векторов напряженности электрического тока и плотности тока, и, таким образом, можно регулировать интенсивность электротокowego воздействия на нано- и микроуровнях.

4. Разработан и опробован алгоритм численного моделирования для задач в двумерной постановке, связанных с анализом электрофизи-

ческой ситуации при наличии ансамбля частиц различной формы, проводимости и размера. Дальнейшая сфера применения и развитие таких работ – это решение термодинамической задачи, потенциально анализирующей образование и рост кристаллов при протекании через расплав электрического тока.

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. Teng Ma, Weixin Hao, Xiaosi Sun, Junting Zhanget al. *Adv Mater Sci Eng.* 2018, (1), 1–6.
5. Chunyan Ban, Han Yi, Qixian Ba, Cui Jianzhong. *Electromagnetic Processing of Material.* 2007, (8), 34–37.
6. Yunhu Zhang, Chanjiang Song, Liang Zhu, Hongxing Zheng et al. *Metall Mater Trans B.* 2011, **42**(3), 604–611.
7. Guangming Xu, Jiawei Zheng, Yong Liu, Jianzhong Cui. *China foundry.* 2005, **2**(3), 171–175.
8. Nakada M., Shiohara Y., Flemings M.C. *ISIJ International*, 1990, **30**(1), 27–33.
9. Tsurkin V.N., Ivanov A.V., Cherepovskii S.S., Vasyanovich N.A. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2016, **52**(2), 56–61.
10. Цуркин В.Н., Иванов А.В. *ЭОМ.* 2017, **53**(4), 60–66.
11. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. *Элементы численного расчета электромагнитных процессов в проводящих средах.* Киев: Изд. Института электродинамики НАН Украины, 1999. 363 с.

Summary

Methods of numerical simulation are applied to investigate the electrophysical effects in the border zones of the phases, which are formed due to the passage of an electric current through the volume of a metal melt with inclusions of conductivity other than the conductivity of the matrix. Some possibilities to change the crystallization incentives of the liquid metal system subject to electric current treatment are shown. Qualitative and quantitative patterns in the processes of the formation of surface effects at the phase boundaries are established. This is due to their orientation relative to the streamlines and different conductances of the phase and of the matrix. The studied electric current effect changes the shape, size, and orientation of the growing phases in the melt.

Keywords: melt, electric current treatment, nanoscale particle, crystallization ability, energy factors.