

# Поливариантный метод кондукционной электротокковой обработки расплава

В. Н. Цуркин\*, А. В. Иванов, Ю. М. Запорожец, А. А. Жданов, Н. В. Честных

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Богоявленский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, \*e-mail: [artiomsan@gmail.com](mailto:artiomsan@gmail.com)*

Поступила в редакцию 30.01.2023

После доработки 25.05.2022

Принята к публикации 30.05.2022

Изучены перспективы использования в литейном производстве кондукционной электротокковой обработки расплава одновременно несколькими типами тока. Такой принцип в сочетании с различными конструкциями электродных систем позволяет формировать в расплаве поливариантную топологию электромагнитного поля, качественно и количественно по-разному формируя термосиловое нагружение расплава. Для этого найдены условия улучшения показателей качества литого металла. Методами имитационного моделирования найдены варианты обработки, способные активно улучшать инкубационные процессы кристаллизации. Экспериментально подтверждены результаты имитационного моделирования. Установлено, что одновременная обработка двумя типами тока при энергозатратах, которые в 3 раза меньше обработки одним источником тока, на 13% увеличивает временное сопротивление, а относительное удлинение – в 1,5 раза. Относительное сужение образца зафиксировано на уровне 4,4%, что не удастся обеспечить для сплава системы Al-Si другими методами обработки. Структура эвтектики модифицирована, зерна  $\alpha$ -Al приобретают округлую форму.

*Ключевые слова:* металлический расплав, электротокковая обработка, варианты воздействия, электродные системы-источники тока, мультифизические процессы, имитационное моделирование, топология полей, физический эксперимент

УДК 621.745.56:621.74.02

<https://doi.org/10.52577/eom.2023.59.5.25>

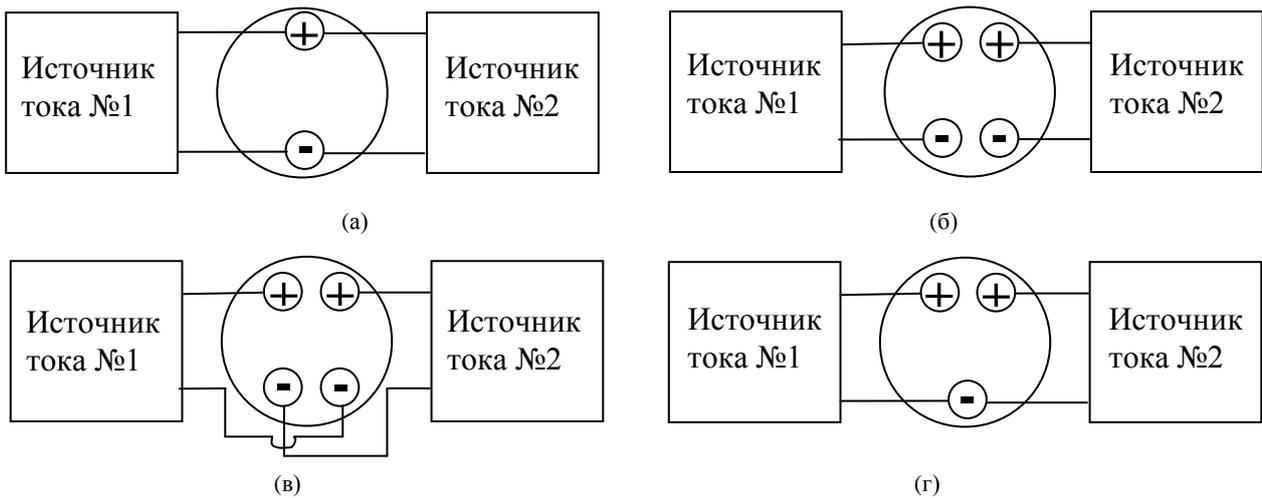
## ВВЕДЕНИЕ

В заготовительном литейном производстве для обеспечения высоких показателей качества металлопродукции используют технологические методы, нацеленные на формирование благоприятных эффективных условий кристаллизации расплава. Как показывают результаты исследований (уже многочисленные), например [1–5], хорошие инновационные перспективы в этом плане демонстрирует метод кондукционной электротокковой обработки (КЭТО) расплава. Для этого используют источник тока любого типа: постоянный по знаку или величине (DC или CC), переменный (AC), импульсный (PC), который с помощью электродов подключают к расплаву. При этом в его объеме генерируются физические поля. Прежде всего это первичное электромагнитное поле, которое в силу своей физической природы формирует тепловое и акустическое поля, а также поле гидродинамических течений. Их кооперативное термосиловое воздействие на объект за один цикл обработки обеспечивает дегазацию расплава, его гомогенизацию в макрообъеме, удаление неметаллических включений, увеличение топологического беспорядка атомарной структуры и

активное формирование центров кристаллизации [1–6].

Анализ публикаций относительно КЭТО показал, что все авторы для реализации этого метода используют один тип тока и пару электродов. Но ранее было показано [6, 7], что по функциональному воздействию на расплав типы токов разнятся. Это приводит к разному целевому эффекту обработки. Таким образом, научный и практический интерес может представлять изучение процессов при КЭТО одновременно различными типами токов. Здесь следует ожидать качественно и количественно разное многовариантное распределение характеристик генерируемых в расплаве физических полей. В этом случае можно найти условия, при которых интегральное термосиловое воздействие на расплав без дополнительных энергозатрат обеспечит более высокие показатели качества литого металла, чем один тип тока.

В пользу этой гипотезы можно упомянуть эффективное влияние на формирование структуры кристаллизующегося сплава скрещенных электрического и магнитного полей [8]. Также позитивный результат для получения недендритной структуры показала одновременная обработка расплава силумина в темпера-



**Рис. 1.** Примеры вариантов электродных систем: (а) – двухэлектродная система; (б) – четырехэлектродная с параллельными токами; (в) – четырехэлектродная со скрещенными токами; (г) – трехэлектродная с V-образными токами.

турном интервале стояния солидус СС и РС типами тока [9].

Цель настоящего исследования – показать научную и практическую перспективность изучения процессов КЭТО одновременно несколькими типами токов, чтобы в конечном счете найти физические, технические и технологические факторы, обеспечивающие повышение характеристик качества литого металла.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМНОЙ СИТУАЦИИ

Следует оговорить, что наше исследование ограничено КЭТО расплавов на основе алюминия. Кроме того, по-нашему мнению, наиболее эффективным является электротокое воздействие в температурном интервале жидкого состояния ( $T > T_L$ ). Флуктуационный, зыбкий беспорядок атомарной и мезоструктур жидкого металла находится в более благоприятном для обработки термодинамическом квазистабильном состоянии, чем постоянно увеличивающийся порядок при кристаллизации и твердении ( $T_L > T > T_S$ ). Тем более что обработка жидкого состояния обеспечивает минимизацию негативных наследственных признаков шихты и формирование благоприятных инкубационных процессов кристаллизации, то есть кристаллизационной способности расплава.

Накопленный опыт исследования процессов КЭТО одним типом тока позволит нам использовать отработанные методики имитационного моделирования и физического эксперимента. Естественно, потребуется их корректировка, учитывающая особенности одновременной обработки разными типами токов.

В отличие от принципа КЭТО одним типом тока в нашем случае нужно анализировать процессы, формируемые при различных вариантах электродных систем. На рис. 1 для сравнения показаны четыре простых случая. Здесь емкость с расплавом показана сверху.

Заметим, что расположение электродов в емкости с расплавом относительно друг друга, одно- или разнонаправленные их полярности в совокупности с разными источниками тока потенциально способны качественно и количественно существенно изменять топологию и характеристики генерируемых в расплаве полей и, как результат, менять интенсивность термосилового воздействия [6].

Таким образом, только за счет выбора типа электродной системы без изменений характеристик и параметров источников тока открываются широкие возможности управлять процессом нагружения объекта обработки. Отметим, что техническая реализация этих вариантов должна обеспечивать электросовместимость источников токов и защиту их от взаимовлияния.

Для метода КЭТО расплава одной из самых серьезных проблемных ситуаций является то, что реализуемые при этом процессы характеризуются как мультифизические. Кроме того, такими же признаками обладает и объект обработки – сложная многофакторная, многопараметрическая система [6, 10]. Естественно, для КЭТО несколькими типами тока эта проблемная ситуация усложняется. В данном случае на первых этапах исследований логично использовать метод черного ящика, когда для анализа и синтеза изучают совокупность взаимообусловленных интегральных воздействий, которые «превращают» вход в выход для исследуемой системы.

В этом плане в рамках обозначенных понятий цели статьи логично из накопленного опыта использовать два важных условия, которые показали свой позитивный эффект [5, 11, 12].

При выполнении этих условий в объекте обработки формируется максимально возможное термосиловое интегральное воздействие. Этот результат был получен с помощью численных экспериментов, а его работоспособность подтверждена при КЭТО расплавов на основе Al для различных типов тока, параметров источника и масс обрабатываемых сплавов.

**Условие 1.** В расплав за время обработки нужно вводить определенную дозу плотности электрической энергии в суммарном исчислении в пределах от  $0,6 \times 10^8$  Дж/м<sup>3</sup> до  $6 \times 10^8$  Дж/м<sup>3</sup> в зависимости от марки сплава [11].

Правомочность этого условия можно объяснить следующим. Недостаток плотности электрической энергии не может обеспечить необходимый положительный эффект воздействия. А ее избыток, перенасыщение, приводит к неблагоприятным необратимым термодинамическим процессам и явлениям, например таким, как перемодифицирование структуры твердого состояния. В работе [13] неблагоприятное увеличение нагружения металлического расплава поясняется чрезмерной активацией диффузионных процессов. Отметим, что условие дозирования плотности энергии, вводимой в объект обработки, должно выполняться для любого метода энергетической обработки при воздействии на любые материалы (например, водные растворы, гели и т.д.).

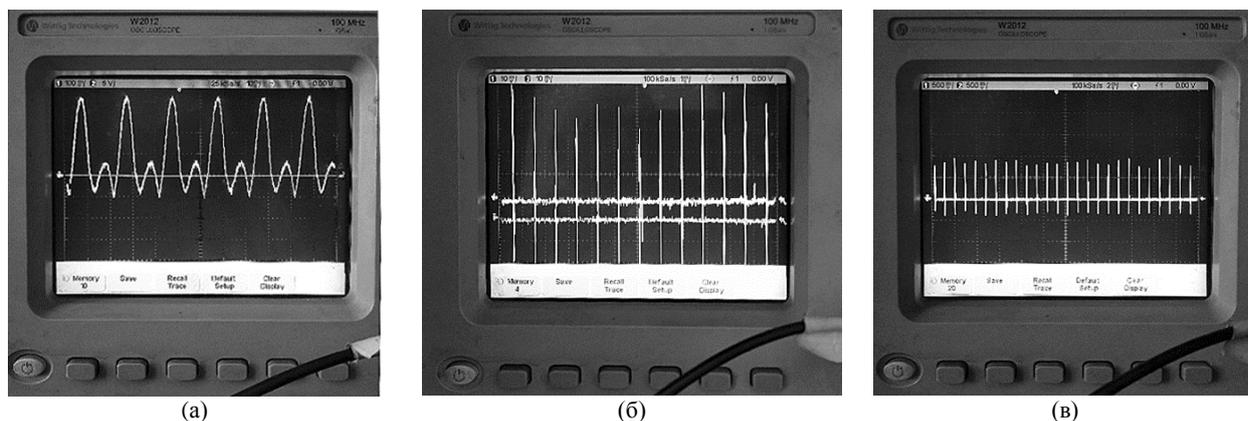
**Условие 2.** Для КЭТО желательно использовать титановые тонкие стержневые электроды с изолированной боковой поверхностью [5, 12]. Торцы положительного электрода располагают у дна емкости с расплавом, а отрицательного – у его поверхности. При обработке сплавов на основе Al возможное растворение Ti всегда позитивно воздействует на размер Al-зерна. Расположение торца отрицательного электрода у поверхности расплава активно влияет на его дегазацию, так как газы в жидком металле, как правило, находятся в ионизированном состоянии (+). Изолированные боковые поверхности позволяют дополнительно формировать в окрестностях электродов вторичные электромагнитные поля. Это происходит вследствие того, что ток не стекает в расплав через поверхность электродов и, естественно, при протекании тока вдоль электрода вокруг него генерируется магнитное поле. Данное поле является «дополнительным» к магнитному полю, которое непосредственно создается протекающим через расплав током. При этом локализация полярности истока–стока

от торцов электродов в зонах, максимально разнесенных в объеме расплава, формирует линии тока, которые пересекают потоки дополнительного электромагнитного поля от боковой поверхности электродов. В результате генерируются нелинейные многофакторные электромагнитные преобразования, которые активно влияют в первую очередь на процессы межатома-марного взаимодействия и элементы микронеоднородности – кластеры. Усиливаются флуктуационные эффекты, формируются диссипативные структуры. Топологический беспорядок атомарного и мезоуровневой жидкого металла увеличивается, свободная энергия системы и ее энтропия возрастают. В результате активизируется энергетическое взаимодействие на этих уровнях канонического ансамбля структуры. В макрообъеме жидкий металл становится более однородным.

Естественно предположить, что одновременная обработка расплава несколькими типами тока, да еще и при использовании различных вариантов электродных систем (рис. 1) может активировать эти процессы и, в конечном счете, повысить показатели качества литого металла.

Для интерпретации результатов КЭТО, поиска адекватных рациональных принципов управления воздействием необходимо проводить детальный анализ и синтез мультифизических процессов, которые генерируются в расплаве. При выборе методов их формализации, как и вычислительных алгоритмов, логично использовать принципы системного анализа. К сожалению, для литейного производства эти подходы пока только формируются [14]. Здесь проблемная ситуация может быть акцентирована на определении ключевых факторов мультифизической системы в кооперативном формировании суммарного термосилового воздействия с признаками экстремума. В этом плане целесообразно логико-математическое описание объекта исследований, для оценки его функционирования, выполнить методами имитационного моделирования в упрощенной постановке, пока не ставя перед собой задачи оптимизировать как эффекты воздействия, так и результаты его цели [10].

На данном этапе роль имитационного моделирования заключается в том, чтобы показать возможные условия, при которых потенциально может быть улучшена кристаллизационная способность расплава за счет формирования энергетически более активного базового электромагнитного поля. Роль физического эксперимента – подтвердить позитивный эффект КЭТО расплава разными типами токов при параметрах и условиях воздействия, полученных имитационными моделями.



**Рис. 2.** Характерные осциллограммы токов для электродных систем, представленных на рис. 1: (а) – сумма AC (50 Гц) и DC (100 Гц); (б) – сумма DC (100 Гц) и PC (1 кГц); (в) – сумма DC (100 Гц) и PC (1 кГц); (а, б) – двухэлектродная система; (в) – четырехэлектродная система.

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРВИЧНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Для уверенной постановки задач имитационного моделирования предварительно были получены осциллограммы токов для вариантов электродных систем на рис. 2. Рис. 2а,б показывают, что в двухэлектродной системе осциллограмма соответствует практически ситуации, когда токи можно записать как сумму токов первого и второго источников. Для четырехэлектродной системы (рис. 2в) каждая пара электродов замыкается своим каналом проводимости. Каждый из них рассредоточен в объеме расплава в соответствии с типом электродов и параметрами токов. Поэтому в данном случае суперпозиция токов формируется наложением электромагнитных полей в объеме расплава.

В обобщенной постановке концепции исследований мультифизическая система описывается процессами в каноническом ансамбле энергетических уровней структуры объекта обработки и соразмерных энергетических уровней его нагружения. В этом случае обобщенную базу имитационного моделирования можно сформировать для анализа тремя имитационными моделями [6].

**Пространственная модель** системы КЭТО включает емкость с жидким металлом, например цилиндрического типа, и погруженную в нее электродную систему одного из вариантов на рис. 1.

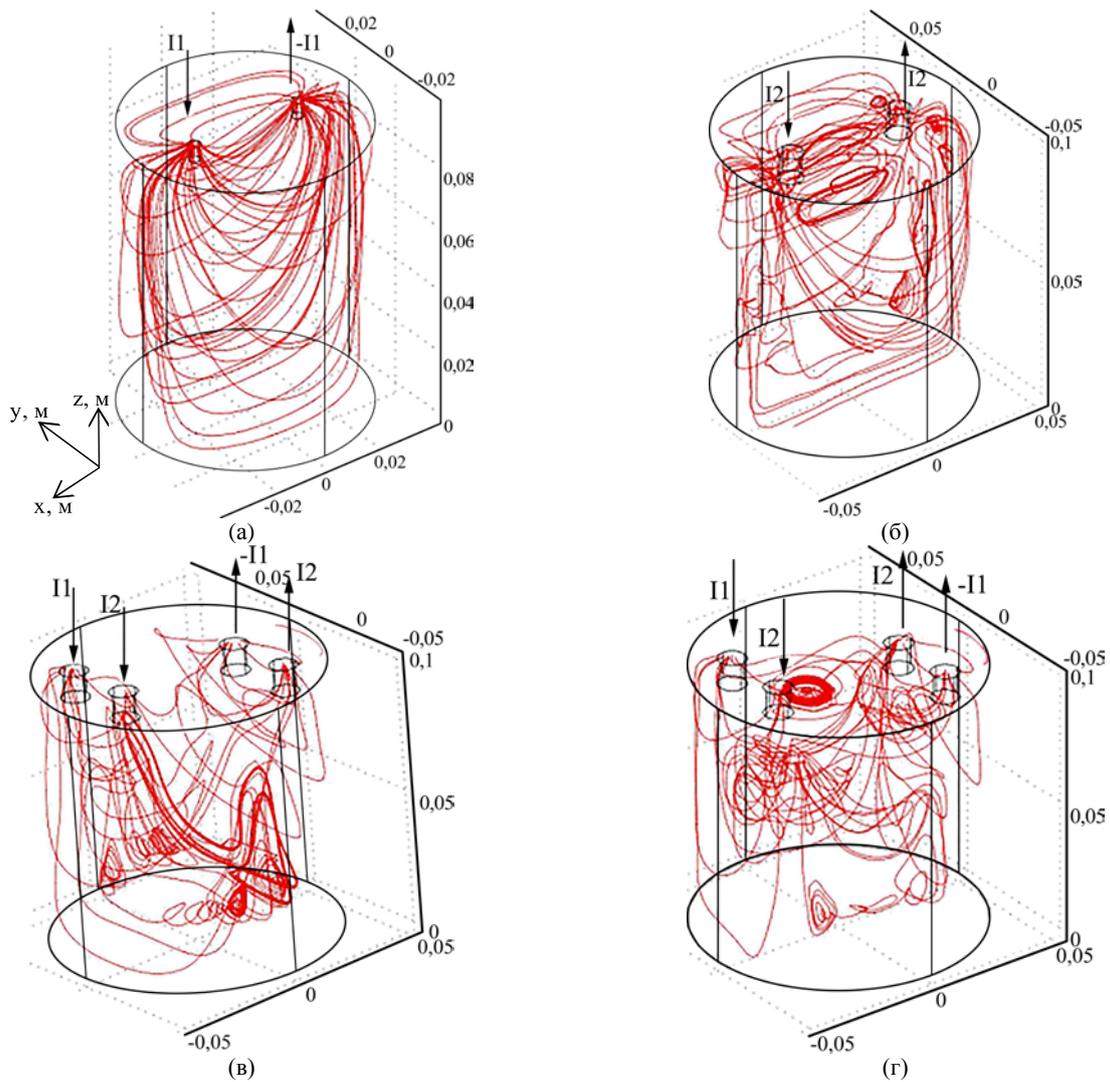
**Физическая модель** описывает комплекс изучаемых явлений в рамках модельных представлений электро-, магнито-, гидродинамики, акустики, тепломассообмена и термодинамики. Здесь при моделировании используют принцип декомпозиции совокупности взаимосвязанных физических явлений на отдельные составляющие с учетом принципа причинно-следственной связи [15].

**Энергетическая модель** определяет описание энергетических потоков, которые формируют физические явления, а также параметры их локализованного влияния на объект обработки. К сожалению, на современном уровне знаний пока нет четких представлений, благодаря каким взаимодействиям на атомарном и мезоуровне происходит формирование благоприятных структурных конфигураций в жидком металле. Поэтому данный аспект проблемной ситуации пока не позволяет адекватно интерпретировать результат воздействия на объект обработки.

С более подробными пояснениями при описании системы указанных моделей можно ознакомиться в работах [2–4, 6, 7, 10]. Также там изложены принципы формализации исследуемых процессов и соответствующие вычислительные процедуры КЭТО одним типом тока.

В рамках исследований, описываемых в статье, как и в случае КЭТО одним типом тока, был использован численный метод конечных элементов (МКЭ), реализованный, например, в программных пакетах, таких как ANSYS или COMSOL MultiPhysics. Это связано с тем, что для математического моделирования электромагнитных полей используются дифференциальные уравнения в частных производных эллиптического типа (ДУЧП) Лапласа и Пуассона. Для решения таких уравнений в 2D и 3D постановках широко применяется МКЭ с соответствующими граничными и начальными условиями.

Проблема определения граничных условий для ДУЧП может быть решена при анализе распределения потенциала по замкнутой граничной поверхности расчетной области (задача Дирихле) или распределения его нормальной производной (задача Неймана). Но эти методы относительно громоздки. Поэтому мы рекомендуем использовать для определения



**Рис. 3.** Варианты распределения базового электрического поля при разных типах токов; (а) – тип тока  $I_1$  – СС, два электрода; (б) – тип тока  $I_2$  – АС (5кГц), два электрода; (в) – типы тока:  $I_1$  – СС,  $I_2$  – АС (5кГц), четыре электрода, параллельные токи; (г) – типы тока:  $I_1$  – СС,  $I_2$  – АС(5кГц), четыре электрода, скрещенные токи.

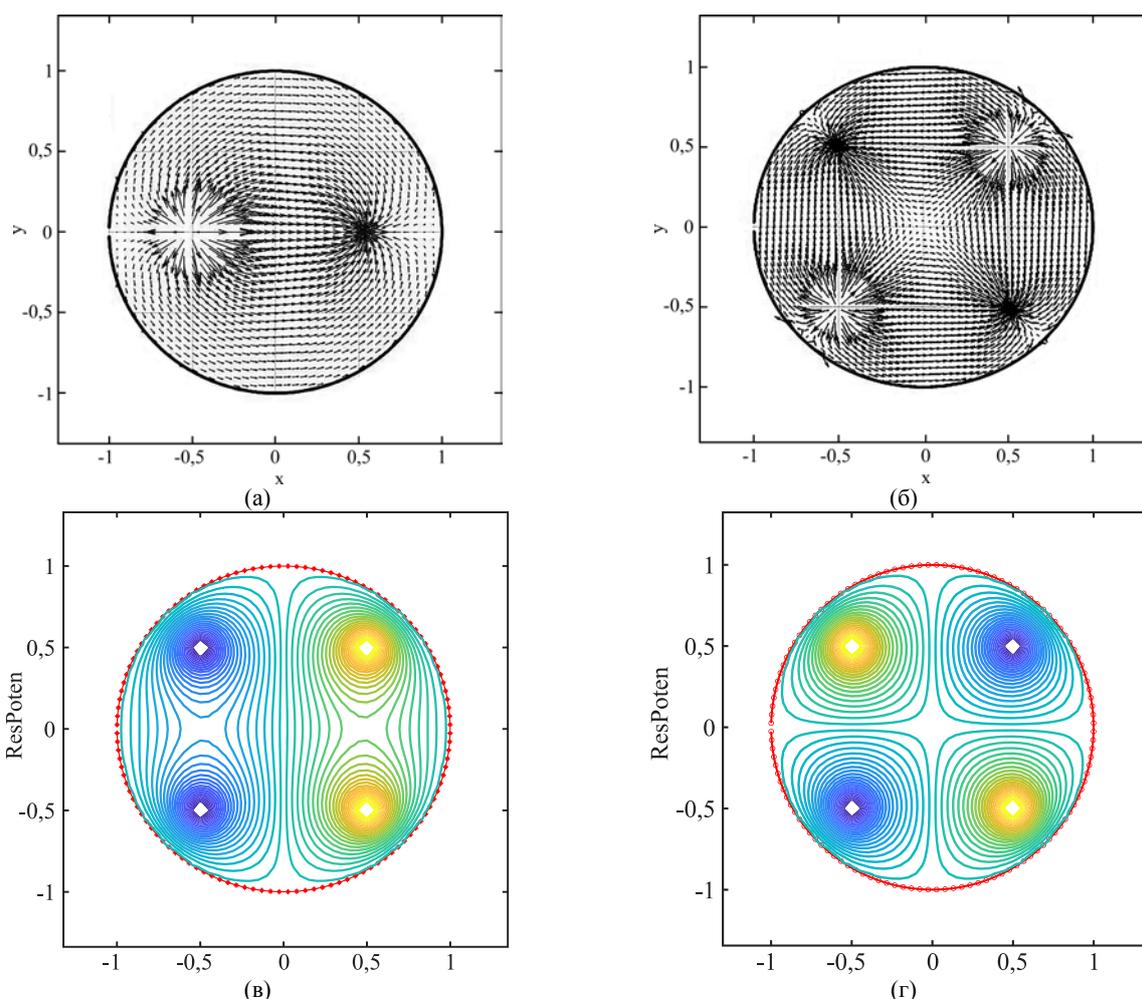
граничных условий метод разбиения массивных проводников на элементарные ячейки (М-Я) [16]. Третий метод, применяемый при исследовании – метод интегральных уравнений (МИУ) [6, 15, 17]. Его преимущества очевидны в ситуациях, когда пространственную область взаимодействия или множество, в котором локализуется процесс, удастся эквивалентно подать на множестве меньшей размерности. Здесь задача преобразуется из варианта 3D в 2D, размерность системы уравнений снижается на порядок. Кроме того, совокупность МКЭ, МИУ, М-Я при исследовании процессов КЭТО позволяет получать результаты с признаками валидации и верификации.

Представим некоторые первичные результаты имитационного моделирования, которые показывают как продуктивность выбранных нами методов анализа, так и потенциальную функциональную эффективность метода КЭТО одновременно несколькими типами токов. На рис. 3 в формате 3D для сравнения показаны распределения базового электрического поля для

разных вариантов «тип тока–электродная система». При этом амплитудное значение переменного и сила постоянного тока были одинаковы. Результаты получены МКЭ.

Здесь электроды размещены в расплаве на небольшой глубине. Такой упрощенный вариант выбран на начальном этапе исследований, чтобы протестировать возможности МКЭ. Рис. 3 убедительно показывает принципиальное отличие в формировании сферы влияния на расплав (базового электрического поля) вариантов с двумя и четырьмя электродами. Случаи на рис. 3в,г прежде всего показывают существенную зависимость топологии поля от взаимного расположения полярности электродов. В обоих вариантах, в отличие от двух электродов, поле становится более неоднородным, что, по нашему мнению, может более эффективно влиять на термодинамическое состояние системы расплава.

Чтобы подчеркнуть роль типа электродных систем в формировании первичного базового



**Рис. 4.** Векторные поля и эквипотенциалы напряженности электрического поля для двух- и четырехэлектродных систем при СС: (а) – векторное поле напряженности для двухэлектродной системы; (б) – векторное поле напряженности для четырехэлектродной системы; (в) – эквипотенциалы электрического поля для четырехэлектродной системы (параллельные токи); (г) – эквипотенциалы электрического поля для четырехэлектродной системы (скрещенные токи).

электромагнитного поля, представим на [рис. 4](#) тестовые качественные результаты, полученные для поперечного сечения цилиндрической емкости в 2-мерной (азимутальной) постановке МИУ.

В отличие от ситуации в азимутальной постановке задачи ([рис. 4](#)) для анализа распределения базового электрического поля исследуем в меридиональной постановке (продольное сечение емкости) ситуацию одновременного воздействия АС (50 Гц) и DC (100 Гц) токов, которые подводятся двумя электродами. При этом проанализируем последствия электрического поля на формирование теплового поля и поля скоростей в расплаве.

Решалась система уравнений Максвелла, Навье-Стокса и Фурье. Переменный ток формализован в виде  $I_a = I_0 \sin(2\pi t/T)$ , выпрямленный – в виде  $I_b = I_0 \sin^2(2\pi t/T)$ . Суперпозиция токов  $I_c = I_a/2 + I_b/2 = (I_0/2)\sin(2\pi t/T) + (I_0/2)\sin^2(2\pi t/T)$ . Причем амплитудные значения токов в обоих случаях равны,  $I_0 = 40\text{А}$ , период тока  $T = 0,02\text{с}$ . Время моделирования  $t$  ограничено величиной

0,04 с, интервал разбиения  $\Delta t = 0,1$  мс. Вычислительные процедуры выполнены МКЭ. На [рис. 5](#) показаны геометрическая модель задачи и точки визуализации данных изучаемых процессов. Electrodes разнозаглубленные с изолированной боковой поверхностью.

На [рис. 6](#) представлены временные зависимости распределения электрического поля в точках визуализации в течение 0,04 с. [Рис. 7](#) показывает временные зависимости магнитного, теплового и поля течений.

Представленные результаты свидетельствуют о разнице качественного и количественного распределения анализируемых полей. Но ключевым здесь для пояснения эффекта последствия является изменение теплового поля и поля скоростей течений в сторону активного увеличения скоростей нарастания этих характеристик. Здесь следует ожидать, что за счет активизации мощности суммарного воздействия суперпозиции токов и генерируемых в результате полей более эффективно будет формироваться термосиловое

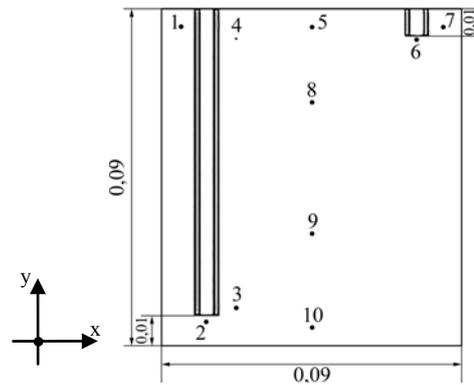


Рис. 5. Геометрическая модель задачи.

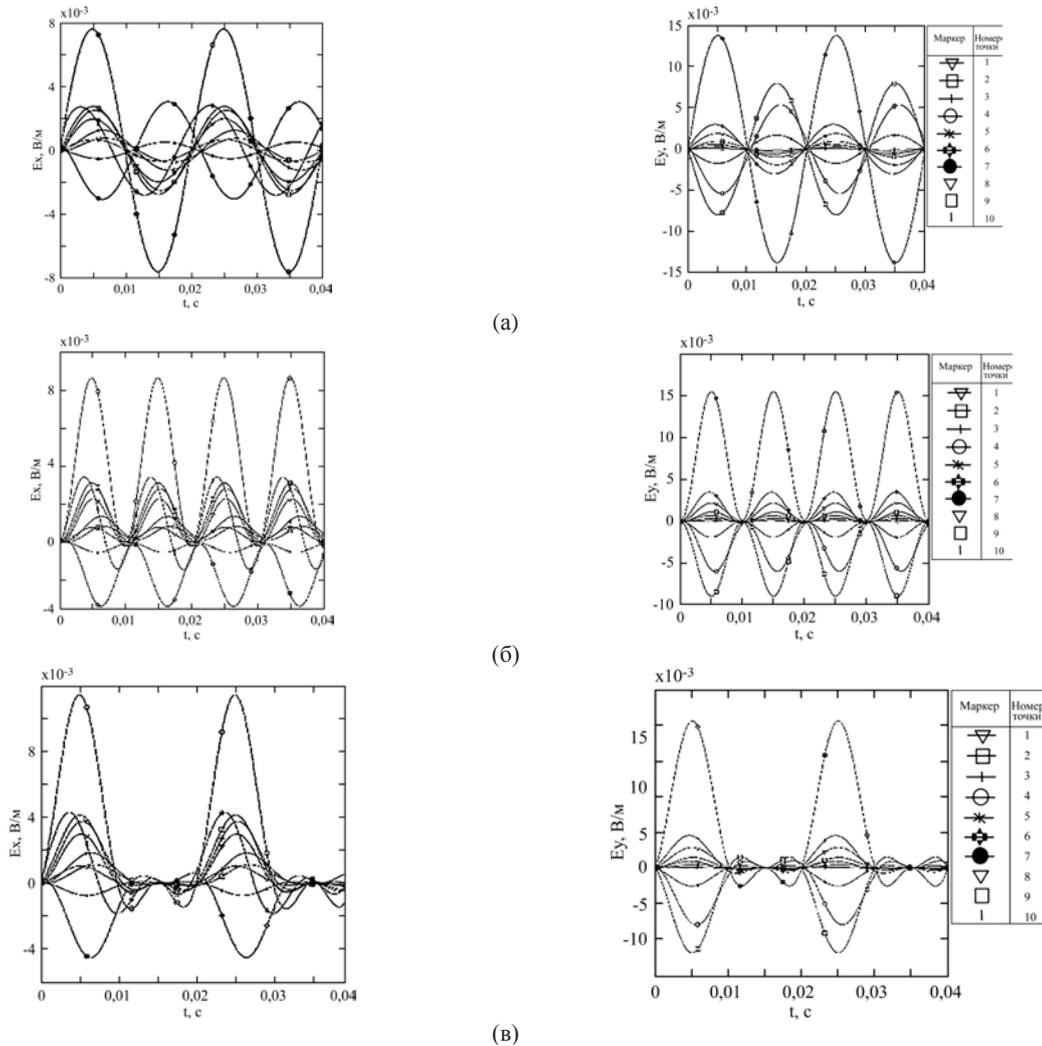


Рис. 6. Зависимости амплитудных значений электрического поля от времени в точках визуализации: (а) – x- и y-компоненты напряженности электрического поля АС (50 Гц); (б) – x- и y-компоненты напряженности электрического поля DC (100 Гц); (в) – x- и y-компоненты напряженности электрического поля АС+DC.

воздействие на инкубационные процессы кристаллизации расплава.

Проверим это предположение в физическом эксперименте.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для пробных экспериментов использовали сплав следующего химического состава: Si(7,3%), Fe(0,5%), Cu(0,5%), Mn(0,07%), Mg(0,07%), Zn(0,2%), Pb(0,01%). Остальное Al.

Масса сплава 0,57 кг выбрана так, чтобы обеспечить полную заливку форм (металлические кокили) для получения образцов-свидетелей. Формы предварительно нагревали до 200 °С. В одной форме получали цилиндрические образцы массой 30 г для анализа микроструктуры. В другой – стандартные образцы для испытаний на растяжение.

Процедура выплавки в шахтной печи сопротивления в металлическом футерованном тигле предусматривала нагрев до 750 °С, удаление

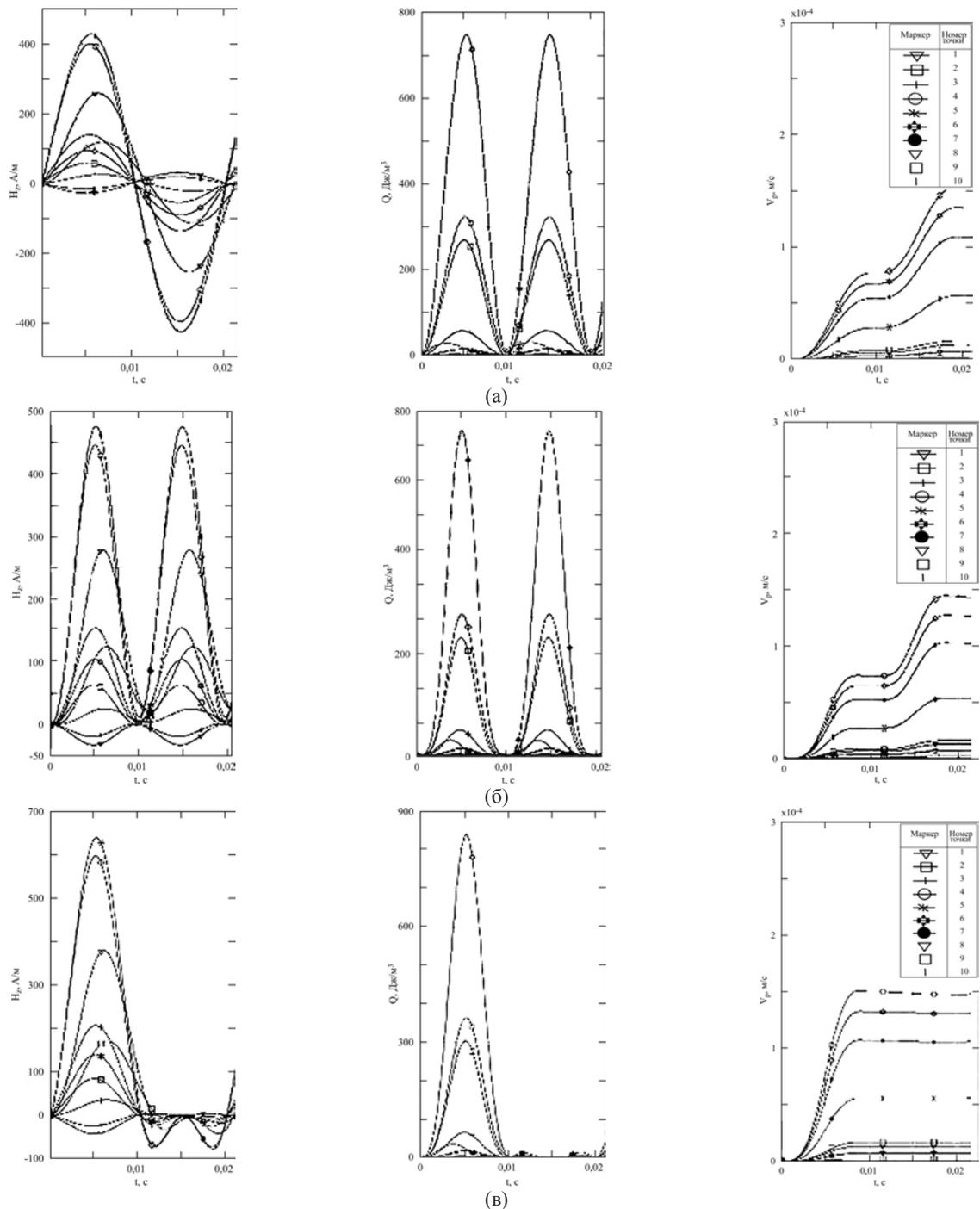
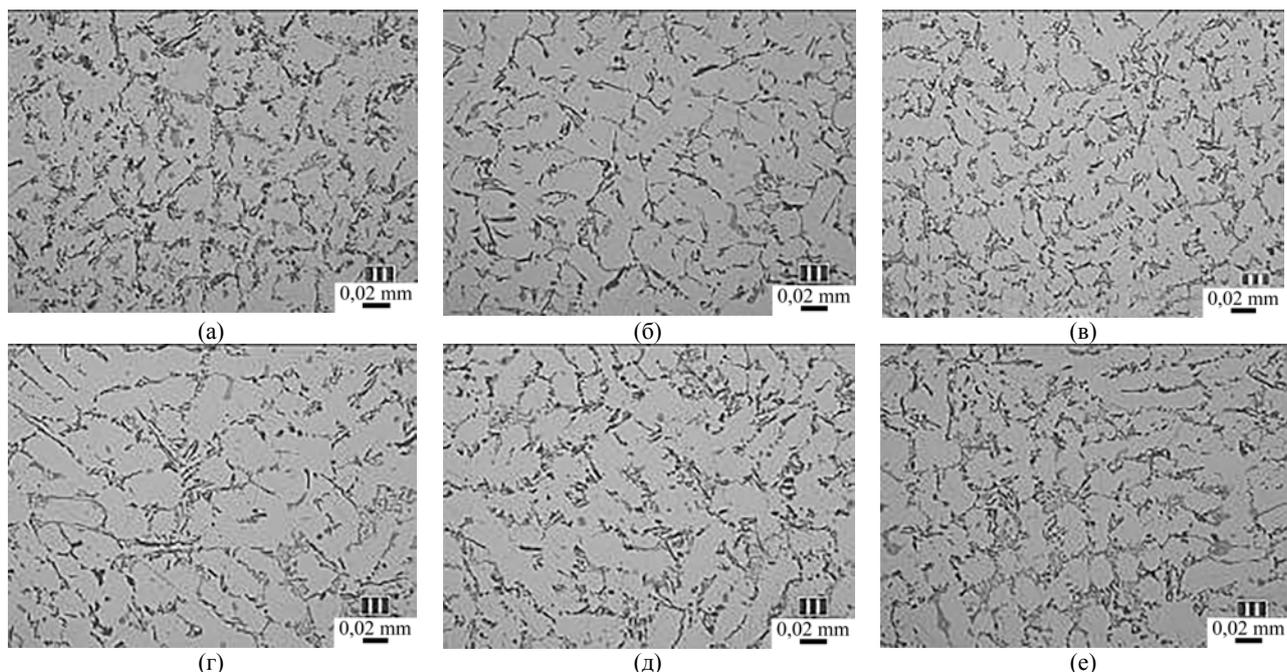


Рис. 7. Зависимости амплитудных значений магнитного ( $H_z$ ), теплового ( $Q$ ) и поля скоростей ( $V_p$ ) от времени в точках визуализации для  $z$ -компоненты: (а) – АС (50 Гц); (б) – DC (100 Гц); (в) – АС+DC.

шлака, кратковременное миксирование расплава, далее выдержку течение 15 минут при постоянной температуре, повторные удаление шлака и миксирование. Затем или проводилась заливка для получения контрольных образцов или КЭТО по заданной программе с последующей заливкой. Температура заливки 710 °С.

Для КЭТО использовали одну пару разнозаглубленных электродов из Ti с изолированной боковой поверхностью, а также два источника тока: АС(50 Гц) и DC(100 Гц). Сравнивали результаты обработки одним типом тока и

одновременно двумя. При этом соблюдали принцип дозированного ввода плотности электрической энергии. Ввели  $2 \times 10^8$  Дж/м<sup>3</sup> для одного типа тока, а также суммарно при обработке двумя типами тока. Для этого использовали величину тока по 40 А для каждого типа тока в случае обработки одним источником и по 20 А при одновременном воздействии. Время обработки для  $2 \times 10^8$  Дж/м<sup>3</sup> составило 16 минут. Для проверки того факта, что обработка одновременно двумя типами тока может быть более эффективной по сравнению с обработкой одним типом тока, дополнительно отработали 10 минут



**Рис. 8.** Микроструктуры образцов-свидетелей: (а) – без обработки, контрольный; (б) – АС (50 Гц),  $I_0 = 40$  А, время обработки 16 мин; (в) – DC (100 Гц),  $I_0 = 40$  А, время обработки 16 мин; (г) – одновременная обработка АС+DC,  $I_0 = 20$  А, время обработки 16 мин; (д) – одновременная обработка АС+DC,  $I_0 = 20$  А, время обработки 10 мин; (е) – одновременная обработка АС+DC,  $I_0 = 20$  А, время обработки 5 мин.

**Таблица.** Результаты механических испытаний образцов

Образец	Временное сопротивление, $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta_5$ , %	Относительное сужение, $\psi$ , %	Твердость, НВ
Без обработки, контрольный	161	103	2,0	–	76,5
АС(50 Гц), $I_0 = 40$ А, $t = 16$ мин	145	102	2,4	–	76,5
DC(100 Гц), $I_0 = 40$ А, $t = 16$ мин	176	111	3,0	–	76,5
АС+DC $I_0 = 20$ А, $t = 16$ мин	162	125	2,4	3,6	76,5
АС+DC $I_0 = 20$ А, $t = 10$ мин	163	120	2,0	1,6	76,5
АС+DC $I_0 = 20$ А, $t = 5$ мин	182	102	3,0	4,4	76,5
ГОСТ 1583-93	157	–	2,0	–	$\geq 50$

и 5 минут. На рис. 8 представлены микроструктуры образцов-свидетелей, а в таблице – результаты механических испытаний. Металлографические исследования проводились на микроскопе Stemi2000C. Контроль механических свойств выполняли прямым методом на образцах в соответствии с ГОСТ 1583-93 (ДСТУ 2839-94). Твердость по методу Бринелля определяли на приборе INSTRON 3000BLD TM. Определение механических свойств при нормальных условиях выполняли на универсальной измерительной машине INSTRON 20т.

Как видим, контрольный образец (без КЭТО) имеет относительно однородную структуру с рассредоточенной эвтектикой, в которой ее элементы организованы в локальных зонах. Показатели прочности и пластичности отвечают

стандартным значениям. Обработка одним типом тока по-разному повлияла на элементы структуры. В первую очередь, на морфологию эвтектики. Заметим, что функционально DC показал более высокую эффективность воздействия. КЭТО одновременно двумя типами тока доказала ее преимущество даже в случае простой схемы введения электрического тока в расплав одной парой электродов. Более того, наилучший результат достигнут при КЭТО в течении 5 минут, то есть при меньших энергозатратах практически в 3 раза. Здесь получена однородная структура, элементы эвтектики раздроблены, размер зерен  $\alpha$ -Al уменьшен, причем они имеют более округлую форму. Безусловно, это отразилось на механических свойствах. Временное сопротивление  $\sigma_B$  возросло

на 13%, относительное удлинение  $\delta$  увеличено в 1,5 раза. Отметим, что только одновременная КЭТО двумя типами тока привела к тому, что зафиксировано относительное сужение образца  $\psi$  на уровне 4,4%, что не удается обеспечить для этого сплава с использованием других методов обработки расплава.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные в статье результаты можно отнести к разряду пионерных. Здесь не учтены многие составляющие всего спектра ключевых факторов КЭТО в случае воздействия несколькими источниками тока и при использовании различных вариантов электродных систем. Естественно, что при обсуждении наших результатов мы не можем претендовать на полноту и беспелляционное принятие основных аспектов изучаемой проблемы.

Вместе с тем полученные результаты показывают, что предложенный метод обработки расплава имеет хорошую перспективу, как минимум, в плане дальнейших исследований.

Имитационное моделирование, которое ограничивалось постановкой задач и результатами для описания некоторых возможных сценариев процессов, показало существенное отличие в распределении первичного электрического поля в случае использования одновременной обработки расплава двумя типами тока. При этом доказана важная роль типа электродной системы.

На простом примере обработки постоянным и переменным токами двухэлектродной системой было установлено, что одним из возможных вариантов увеличения эффективности воздействия выступало усиление действия теплового поля и поля скоростей. Следует ожидать, что при использовании импульсного тока активизируются нелинейные эффекты в расплаве, а в его локальных зонах возможны явления кратковременной турбулизации (встряхивание). Это потенциально может усилить термосиловое воздействие на расплав в локальных зонах.

Результаты физического эксперимента зафиксировали существенные позитивные улучшения структуры и механических свойств, причем при уменьшении дозы плотности электрической энергии в 3 раза по сравнению с КЭТО одним типом тока, то есть при меньших энергозатратах. Этот факт косвенно показал, что при использовании предлагаемого метода, очевидно, формируются синергетические эффекты.

Учитывая то, что полученные нами результаты подтвердили научную и практическую перспективность изучения КЭТО одновременно несколькими типами токов, мы можем

ввести такое понятие, как «поливариантный метод кондукционной электротокковой обработки расплава» (ПМКЭТОР). Акцент на первом слове представляет широкие возможности выбора любой из систем «источники тока–тип электродной системы» для углубленного исследования и поиска условий повышения качества литого металла с минимизацией энергозатрат. При этом, на наш взгляд, одним из возможных аспектов дальнейших исследований может быть выявление факторов упорядоченного нормированного (дозированного) воздействия на формирование мультифизических процессов на самом глубинном уровне субстанционального строения расплава – электронном, атомарном, мезоуровне. Этот интерес поясняется тем, что энергетические связи их элементов (металлическая и ковалентная) имеют электромагнитную природу. А, так как сама природа электрического поля тока определяет область его формирования именно на этих уровнях структуры, то его непосредственное воздействие на энергетические связи переформатирует их, обеспечивая позитивный ход термодинамических процессов в инкубационной фазе кристаллизации.

### ВЫВОДЫ

1. Предложен новый поливариантный метод кондукционной электротокковой обработки расплава одновременно несколькими типами тока.

2. Описаны основные особенности проблемных ситуаций, возникающие при исследовании процессов, генерируемых в расплаве в этом случае. Основной базой для их разрешения предложено использовать подходы, накопленные при изучении явлений, которые формируются во время обработки одним типом тока, но адаптированные к условиям нового предмета исследований.

3. Одновременная обработка несколькими типами тока может быть поливариантно реализована различными типами электродных систем. При этом в расплаве формируются многовариантные суперпозиции топологии базового электрического поля и его характеристик – сферы влияния на объект обработки. Сочетания типов источников тока и электродных систем предоставят возможность поиска оптимальных способов управления электротокковой обработкой расплава для повышения качества литого металла.

4. Численные исследования выполнены в 2D и 3D форматах с использованием методов конечных элементов, интегральных уравнений и метода разбиения массивных проводников на элементарные ячейки. Это дало возможность

получать условия валидации и верификации результатов анализа и синтеза.

5. В физическом эксперименте одновременная обработка расплава сплава системы Al-Si разными типами тока показала возможность (в отличие от обработки одним типом тока) в 3 раза уменьшить энергозатраты. При этом обеспечено активное улучшение микроструктуры литого состояния и повышение механических свойств отливки. Временное сопротивление увеличилось на 13%, относительное удлинение – в 1,5 раза. Получено относительное сужение на уровне 4,4%, что не удается обеспечить для этого сплава с использованием других методов обработки расплава.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пригунова, А.Г., Петров, С.С., Пригунов, С.В., Структурні та фазові перетворення в доєвтектичних сплавах системи Al-Si-Fe, оброблених у рідкому стані однополярним імпульсним електричним струмом, *Металознавство та обробка металів*, 2017, № 2, с. 20.
2. Ivanov, A.V., Sinchuk, A.V. and Tsurkin, V.N., Electriccurrent treatment of liquid and crystallizing alloys in casting technologies, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2011, no. 5, p. 456.
3. Rübiger, D., Zhang, Y., Galindo, V., Franke, S., et al., Experimental study on directional solidification of Al-Si alloys under the influence of electric current, *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.*, 2016, vol. 143, no. 1, p. 1.
4. Zaporozhets, Y., Ivanov, A. and Kondratenko, Y., Geometrical platform of big database computing for modeling of complex physical phenomena in electric current treatment of liquid metals, *Data*, 2019, vol. 4, no. 4, p. 1. <https://doi.org/10.3390/data4040136>
5. Zhang, Y.H., Xu, Y.Y., Ye, C.Y., Sheng, C., et al., Relevance of electrical current distribution to the forced flow and grain refinement in solidified Al-Si hypoeutectic alloy, *Sci. Rep.*, 2018, vol. 143, no. 1, p. 1.
6. Zaporozhets, Yu.M., Ivanov, A.V., Kondratenko, Yu.P. and Tsurkin, V.M., The features of controlled conductive electric current treatment of liquid metals. In: *Advances in Engineering Research*, Petrova V.M., Ed., vol. 44, 2021. New York: Nova Science Publishers, p. 1.
7. Tsurkin, V.N. and Ivanov, A.V., Peculiarities of distribution of electromagnetic and hydrodynamic fields for conductive electric current treatment of melts in different model, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 55, no. 1, p. 53.
8. Самойлович, Ю.А., *Кристаллизация слитка в электромагнитном поле*. М.: Металлургия, 1986. 169 с.
9. Борисов, Г.П., Цуркін, В.М., Сінчук, А.В., Іванов, А.В. и др., Спосіб одержання металевих заготовок з глобулярною структурою. Патент 101571. Україна. Опубл. 10.04.2013. Бюл. № 7.
10. Zaporozhets, Yu., Ivanov, A., Kondratenko, Yu., Tsurkin, V., et al., Innovative system of computer modeling of multiphysics processes for controlled electrocurrent treatment of melts, *Sci. Innov.*, 2022, vol. 18, no. 4, p. 85.
11. Kim, K.H., Suk, S.H., Цуркін, В.М., Іванов, А.В., Жданов, О.О., Гумененко, М.К., Честних, М.В., Дьогтев, Ю.Н., Вплив електрострумової обробки розплаву алюмінієвого сплаву В95пч на механічні властивості та структуру литого стану з урахуванням додаткової термічної обробки, *Метал та лиття України*, 2020, т. 323, № 4, с. 30.
12. Ivanov, A., Distribution features of electromagnetic and hydrodynamic fields in the conductive electric current treatment of melts using parallel electrodes, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2020, vol. 56, no. 3, p. 327.
13. Гегузин, Я.Е., Катановский, Ю.С., *Диффузионные процессы на поверхности кристалла*. М.: Энергоиздат, 1984. 124 с.
14. Цуркин, В.Н., Проблемы и методы электротокковой обработки расплава в технологиях линейного производства, *Процессы литья*, 2015, № 5, с. 3.
15. Запорожець, Ю.М., Іванов, А.В., Кондратенко, Ю.П., Цуркін, В.М., Комп'ютерні моделі для управління режимами електрострумової обробки розплавів за заданими критеріями якості литих виробів. Ч. 1. *Електронне моделювання*, 2020, т. 42, № 3, с. 53.
16. Честних, М.В., Цуркін, В.М., Іванов, А.В., Черно, О.О., Моделювання розподілу електричного поля в металевому розплаві методом розбиття провідника на елементарні комірки, *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, 2021, т. 56, № 4, с. 35.
17. Запорожець, Ю.М., Іванов, А.В., Кондратенко, Ю.П., Цуркін, В.М., Комп'ютерні моделі для управління режимами електрострумової обробки розплавів за заданими критеріями якості литих виробів. Ч. 2. *Електронне моделювання*, 2020, т. 42, № 4, с. 49.

### Summary

The paper describes the features, scientific and practical prospects for the use in the foundry of the conductive electric current treatment of melt by several types of current simultaneously. It is shown that this principle, in combination with various designs of electrode systems, allows to form a polyvariant topology of an electromagnetic field in melt. At the same time, a thermal force loading of melt is formed qualitatively and quantitatively in different ways, which, ultimately, makes it possible to find conditions for improving the quality

indicators of a cast metal. The studies were carried out by simulation methods, the results of which showed possible treatment options that can actively improve the crystallization incubation processes. To compare the results of the treatment of the Al-Si alloy melt with one type of the current and simultaneously with two types of current, a physical experiment was carried out, which confirmed the assumptions and simulation results. At the same time, it was found that the simultaneous treatment with two types of current is thrice less costly than the treatment with one current source, increased the tensile resistance by 13%,

and the relative elongation by 1.5 times. In this case, a relative narrowing of the sample was recorded at the level of 4.4%, which cannot be provided for this alloy using other methods of melt processing. The structure of the eutectic is actively modified, and  $\alpha$ -Al grains acquire a shape close to a round.

*Keywords:* metal melt, electric current treatment, exposure options, electrode systems – current sources, multiphysical processes, simulation modeling, field topology, physical experiment