Имитационное моделирование характеристик электромагнитного поля в металлическом расплаве при его одновременной обработке кондуктивными и индукционными токами

А. В. Иванов*, В. Н. Цуркин

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: artiomsan@gmail.com

Поступила в редакцию 09.10.2025
После доработки 30.10.2025
Принята к публикации 03.11.2025

Рассмотрены вопросы моделирования характеристик электрического и магнитного полей, генерируемых одновременно кондукционно, то есть путем непосредственного пропускания тока через расплав с помощью электродов-токоподводов, и индукционно – с помощью внешнего индуктора, расположенного над поверхностью расплава. Анализ функциональных возможностей данного метода проводился путем численного эксперимента с применением имитационного моделирования. Полученные результаты показали возможные варианты обработки, потенциально способные активно улучшать инкубационные процессы кристаллизации, что в конечном счете дает возможность найти условия улучшения показателей структуры и свойств литого металла. Установлено, что генезис суперпозиции электромагнитных полей в основном сосредоточен в объеме скин-слоя у поверхности расплава.

Ключевые слова: жидкометаллическая система, имитационное моделирование, энергетическая обработка, кондуктивный ток, индукционный ток, гибридизация электромагнитных полей, генезис электромагнитных полей

УДК 621.3:519.876.5:621.74:303.732.4
https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.6.38

ВВЕДЕНИЕ

Технологические регламенты литейного производства предусматривают для получения высококачественных отливок целенаправленную обработку расплава как в жидкометаллическом состоянии (ЖМС), так и во время его кристаллизации. Как правило, такая задача является многоцелевой. Методы обработки можно классифицировать как реагентные и энергетические. В первом случае в расплав вводят малые дозы различных элементов. Их действие избирательно. Во втором – выполняют энергетическую обработку различными физическими полями. Их действие многофункциональное и многоцелевое [1–3]. Универсальных методов обработки расплавов не существует потому, что проблематика системы технологических процессов литейного производства многофакторная, многопараметрическая и мультифизическая. Но при этом проводится поиск условий, при которых потенциально возможно повысить эффективность существующих методов обработки.

Проблема поиска условий и факторов, которые могут обеспечить повышение показателей эффективности обработки в расплаве, сегодня является актуальной. Например, с помощью комплексных (гибридных) методов, объединяющих в одном технологическом цикле обработки или реагентные, или энергетические методы, или же их комплексирование. Несмотря на то что итоговая результативность гибридного метода может тестироваться только показателями триады «Цена–Качество–Конкурентоспособность», для отливки важными условиями такого поиска являются промежуточные данные, которые показывают потенциальную перспективность новации.

Материалы данной статьи посвящены анализу функциональных возможностей новационного гибридного метода одновременного воздействия на ЖМС кондукционной электротоковой обработки (КЭТО) [4] и магнитно-импульсной обработки (МИО) [5]. При этом анализируется этап формирования термосилового воздействия на объект обработки в суперпозиции их электромагнитных полей (ЭМП).

Цель работы – методами имитационного моделирования показать принципиальную возможность повышения интенсивности характеристик электромагнитного поля, которое генерируется при одновременных кондукционном и индукционном воздействиях.

ОСОБЕННОСТИ КЭТО И МИО

Как КЭТО, так и МИО являются так называемыми электротехнологиями. То есть для их функционирования нужен источник тока. Для КЭТО используется любой тип тока: постоянный по значению (CC), постоянный по знаку (DC), переменный (AC) или импульсный (PC) [3–9]. Для МИО – только импульсный ток (PC) [2, 5, 7, 10, 11]. Как показали экспериментальные данные, действие CC ограничивается в основном только тепловым влиянием, в то же время при использовании DC, AC и PC оно не столь значительно. Здесь превалирует только потенциальная возможность тока совершать работу над расплавом, то есть обеспечивать силовое воздействие [3, 4, 6, 10]. Поэтому в работе влияние CC не анализировали. Отметим, что для КЭТО с AC и DC используют диапазон напряжений до 1000 В, а для PC – как меньше, так и больше 1000 В. При этом диапазон чередований импульсов тока может захватывать в первом случае килогерцовую область, а во втором – только единицы Гц. В работе [12] показана инновационная перспектива одновременной обработки ЖМС несколькими токами. Но в данной работе этот вариант при гибридизации в паре с МИО пока не рассматривался.

При КЭТО электрическая энергия в расплав вводится парой относительно тонких электродов, расположенных соосно с емкостью с расплавом. Их боковая поверхность изолирована, а торцы разнесены по высоте так, чтобы для отрицательного электрода он был у поверхности, а для положительного – у дна. Такая геометрия дает возможность формировать существенно неоднородную топологию ЭМП во всем объеме расплава, а также способствует дегазации расплава за счет направленного движения к отрицательному электроду положительных ионов газов [13].

Важно отметить, что для МИО можно использовать два принципа: индуктор располагается или у боковой, или у донной поверхности емкости, или в объеме расплава, или же у его поверхности. На наш взгляд, последний способ более прост в реализации и энергетически выгоден. Но, к сожалению, информации об этом способе пока недостаточно, хотя и эти данные позволяют нам определить постановку нашей задачи и алгоритм ее решения. Известно, что между плоским спиралевидным индуктором и расплавом желательно обеспечить зазор величиной менее 3 мм. ЭМП при этом генерируется в объеме скин-слоя у поверхности. Для алюминия при PC его характерная величина соответствует порядка 2–3 мм.

На рис. 1 представлен упрощенный вариант геометрической модели задачи.

Важно отметить, что влияние на объект обработки не ограничивается только действием ЭМП как при КЭТО, так и при МИО. По сути, это поле первично и его можно определить, как базовое потому, что в силу своей физической природы оно генерирует в расплаве вторичные поля: электромагнитное, тепловое, гидродинамическое, а в силу электромагнитно-акустических преобразований – акустическое поле. Для МИО именно это поле является превалирующим [14]. На рис. 2 показаны этапы соответствующих энергетических превращений, генерируемых базовым электромагнитным полем (БЭМП).

В силу того, что полное исследование как КЭТО, так и МИО связано с анализом мультифизических, многопараметрических и многофакторных процессов, в нашем случае эта проблема (гибридизация КЭТО+МИО) еще более усложняется. Поэтому логично обратиться сначала только к подсистеме «суперпозиция ЭМП» в рамках поставленной цели работы. При этом целесообразно сделать некоторые упрощения.

Постановка задачи исследований. Рассмотрим ЖМС из алюминиевого сплава типа А356 при температуре, превышающей температуру плавления на 100 К. Массу расплава определим как 1 кг. На рис. 3 представлена геометрическая постановка задачи в формате 2D. Здесь T1, T2, T3, T4 – точки визуализации, в которых анализируется генезис ЭМП в случае КЭТО+МИО. Плоский спиралевидный индуктор располагается над поверхностью ЖМС на расстоянии 2 мм. Материал индуктора – медь. Координаты точек визуализации (в метрах): T1 (0,012; 0,006), T2 (0,04: 0,089), T3 (0,04; 0,045), T4 (0,068; 0,078). На рис. 3 размеры показаны в миллиметрах.

Проанализируем ситуацию гибридизации полей в соответствии с парами токов: AC+PC(МИО); DC+PC(МИО); PC(КЭТО)+PC(МИО). Временные зависимости токов формализуем следующим образом: $I_{AC} = I_0 \times \sin(2\times\pi\times t/T)$; $I_{DC} = I_0 \times \sin^2(2\times\pi\times t/T)$, $I_{PC} = I_0 \times (\sin^2(2\times\pi\times t/T_u) + \sin(2\times\pi\times t/T_u))$. Здесь I_0 – амплитудное значение тока, А; t – время, с; T – период тока, с; $T_и$ – период посылок импульсов тока, с. Для всех случав примем, что: $I_0 = 40$ А; $T = 2\times10^{-2}$ с; $T_u = 2\times10^{-3}$ с. Время визуализации ограничим значением T. Интервал разбиения T определим величиной $\Delta t = 25\times10^{-6}$ с. Физические параметры ЖМС (сплав А356): плотность расплава 2200 кг/м^3, удельная электропроводность 2×10^6 См/м [15].

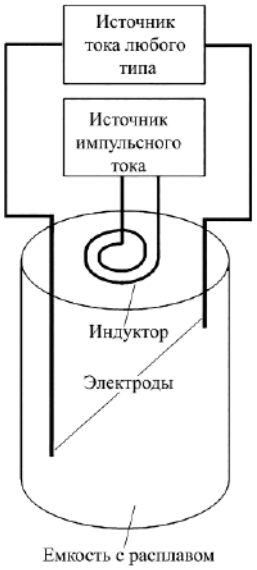


Рис. 1. Упрощенный вариант геометрической модели задачи.

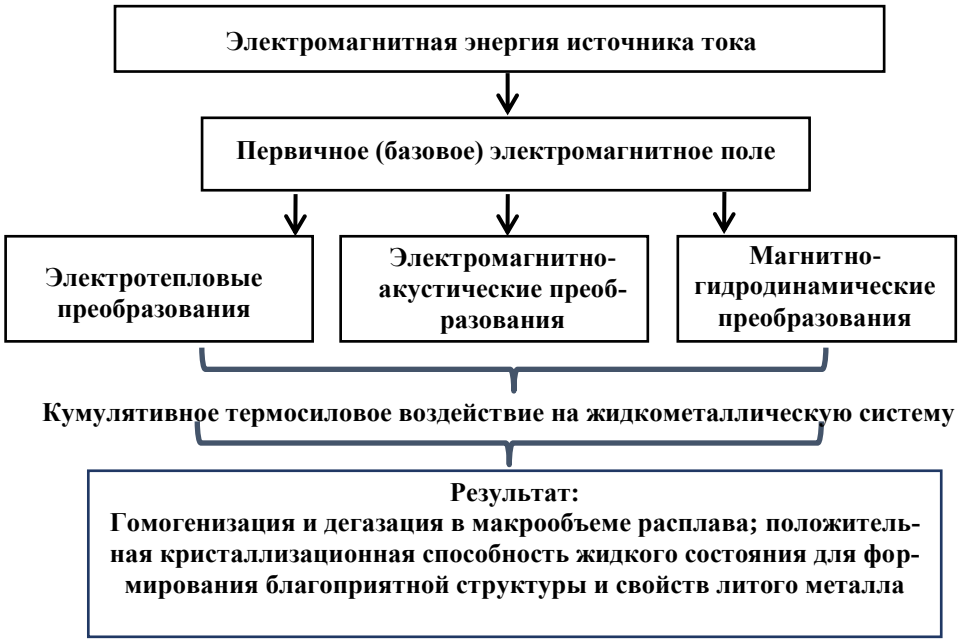


Рис. 2. Этапы энергетических превращений, генерируемых БЭМП.

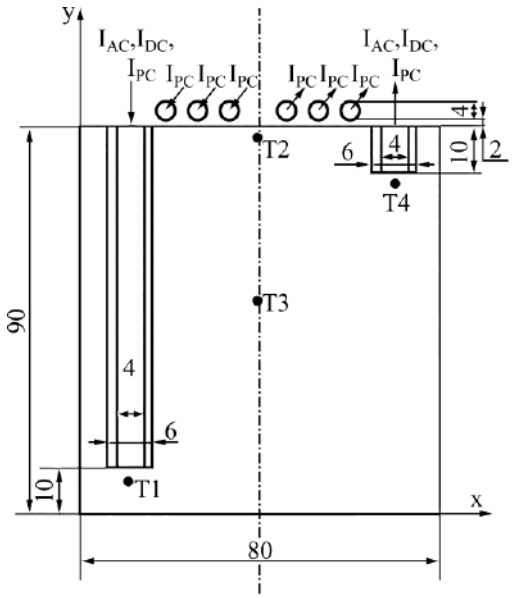


Рис. 3. Геометрическая постановка задачи.

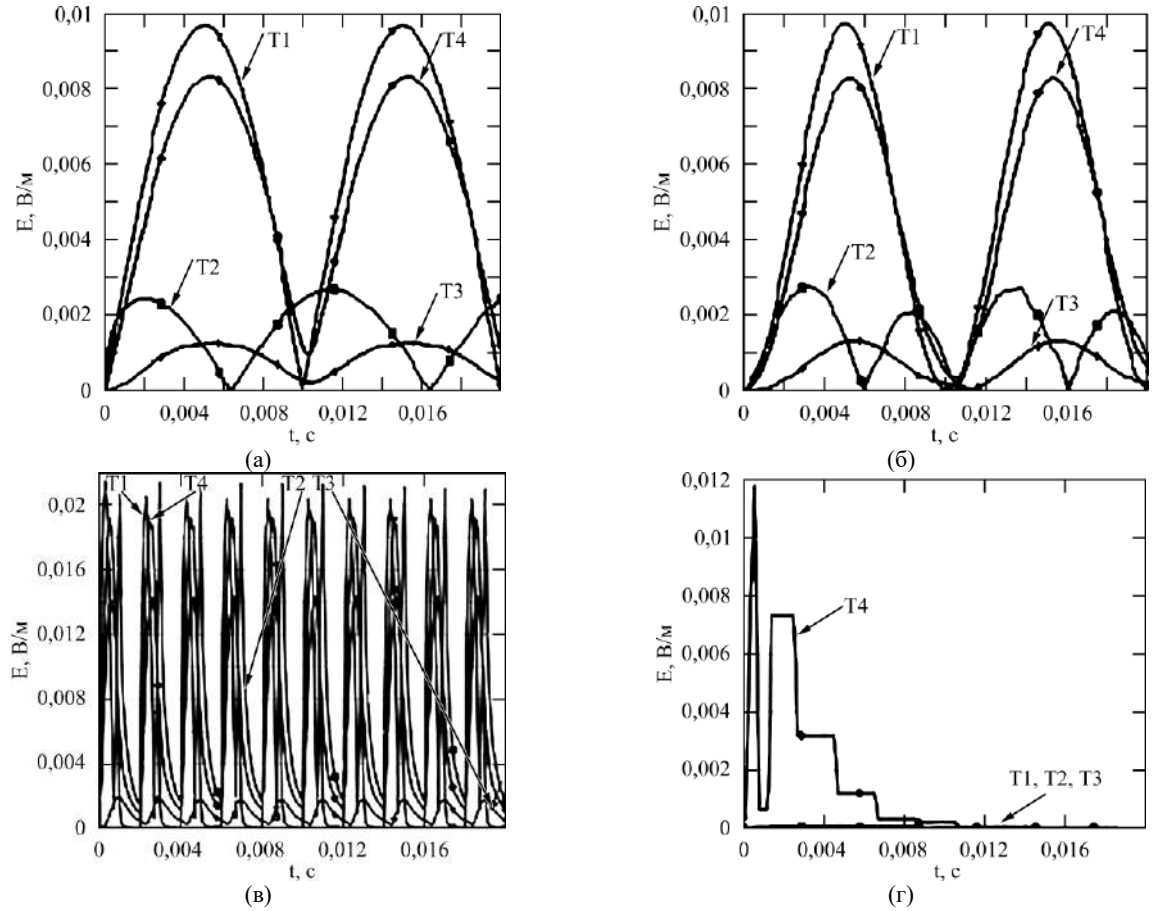


Рис. 4. Зависимости от времени значений напряженности электрического поля для КЭТО и МИО: (а) – КЭТО (I_{AC}); (б) – КЭТО (I_{DC}); (в) – КЭТО (I_{PC}); (г) – МИО (I_{PC}).

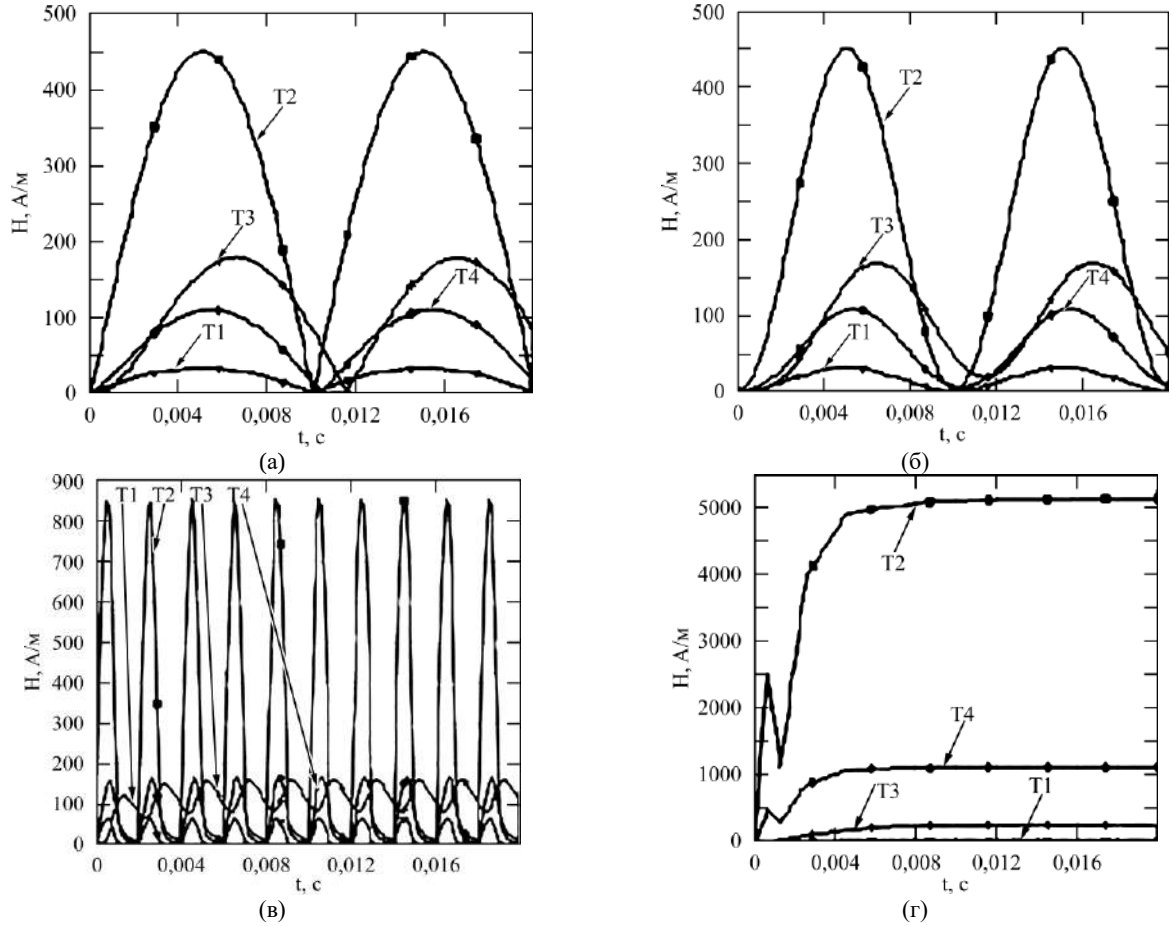


Рис. 5. Зависимости от времени значений напряженности магнитного поля для КЭТО и МИО: (а) – КЭТО (I_{AC}); (б) – КЭТО (I_{DC}); (в) – КЭТО (I_{PC}); (г) – МИО (I_{PC}).

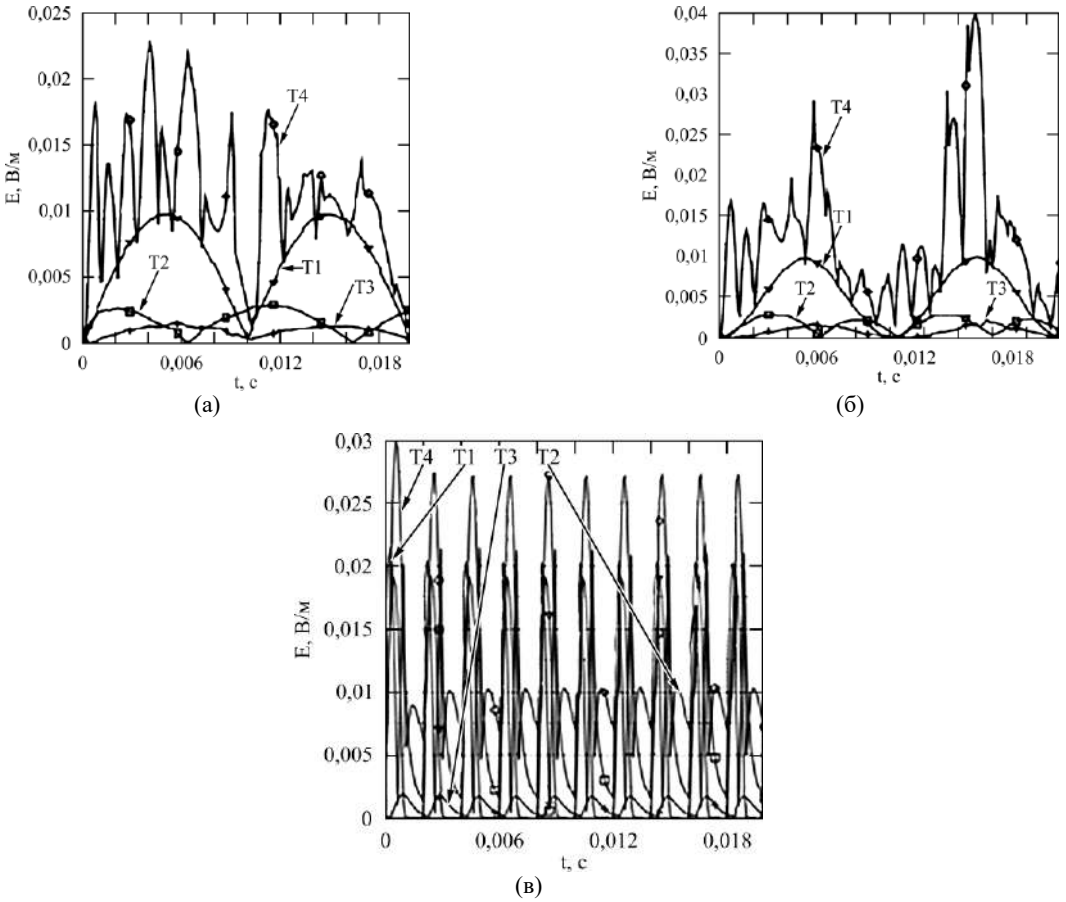


Рис. 6. Зависимости от времени значений напряженности электрического поля в случае гибридизации КЭТО+МИО: (а) – КЭТО (I_{AC})+МИО (I_{PC}); (б) – КЭТО (I_{DC})+МИО (I_{PC}); (в) – КЭТО (I_{PC})+МИО (I_{PC}).

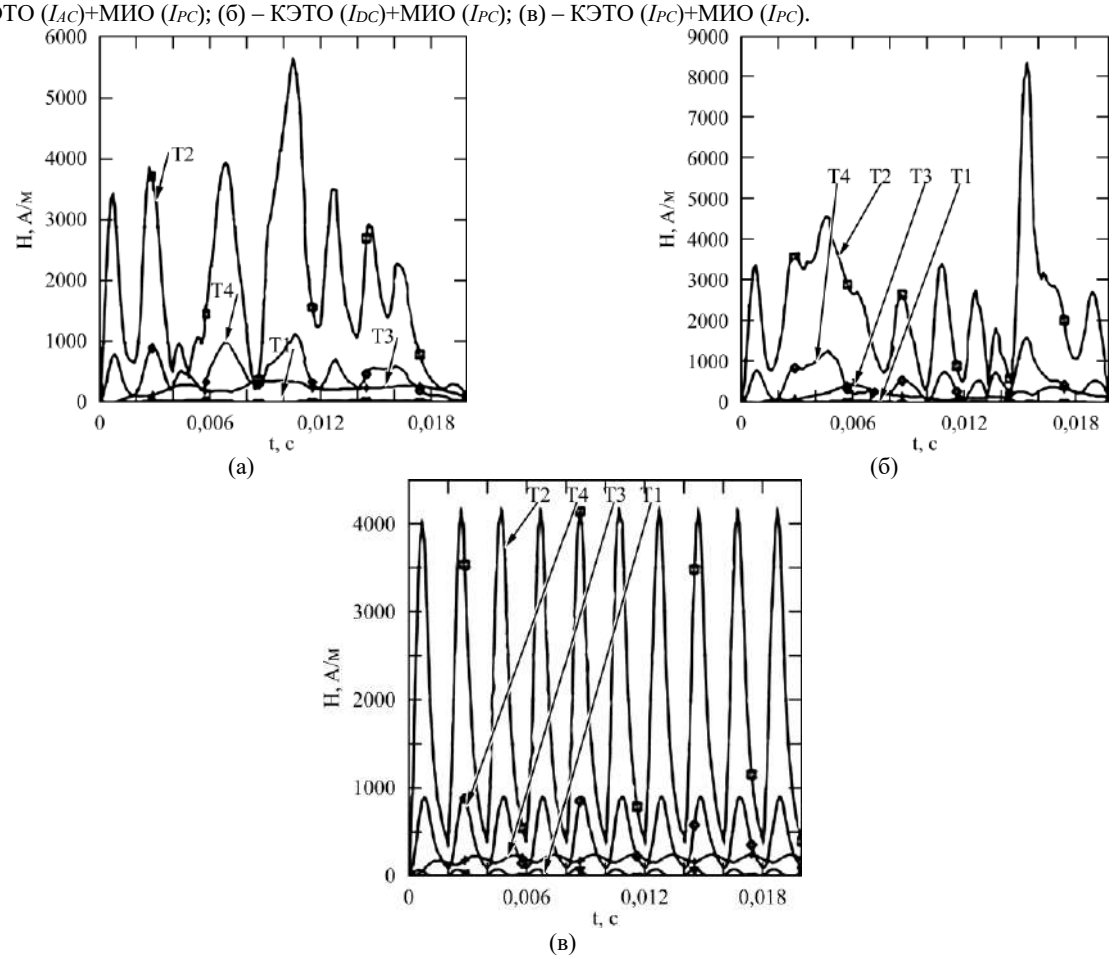


Рис. 7. Зависимости от времени значений напряженности магнитного поля в случае гибридизации КЭТО+МИО: (а) – КЭТО (I_{AC})+МИО (I_{PC}); (б) – КЭТО (I_{DC})+МИО (I_{PC}); (в) – КЭТО (I_{PC})+МИО (I_{PC}).

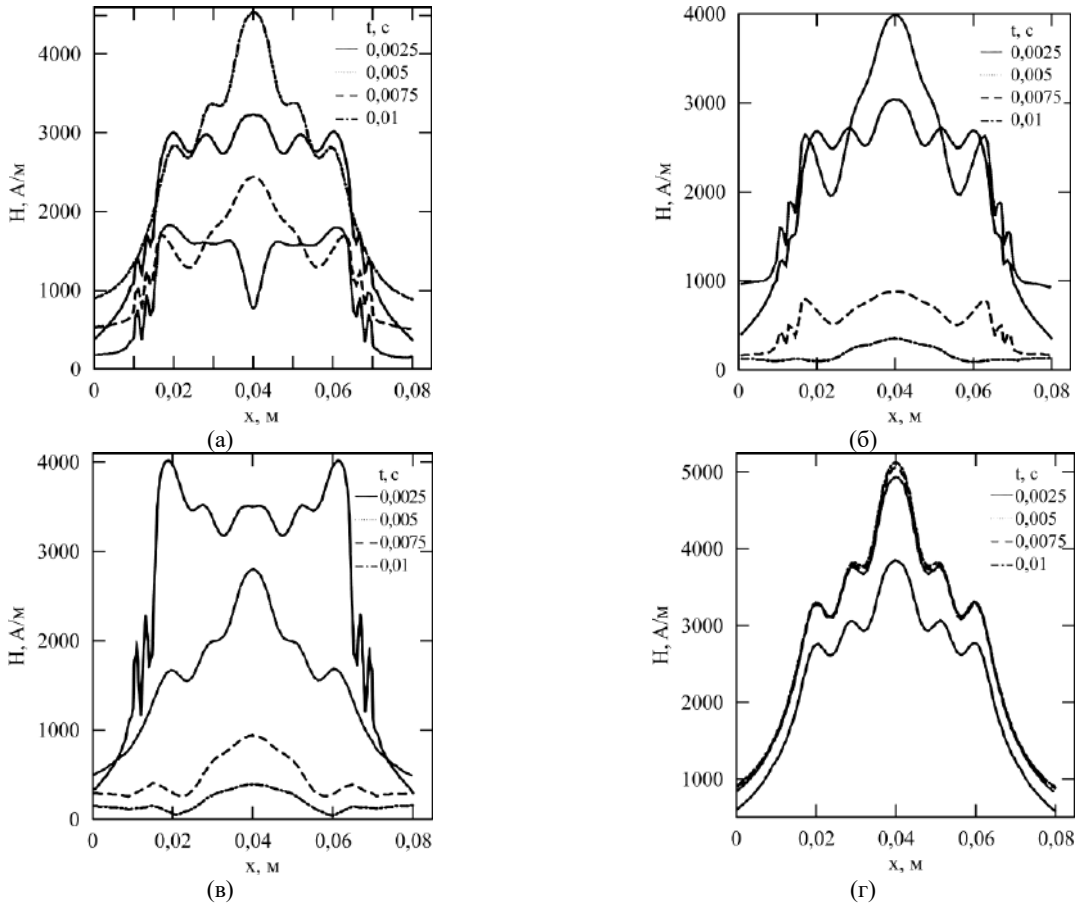


Рис. 8. Распределение напряженности магнитного поля в сечении, параллельном поверхности ЖМС, для различных вариантов обработки: (а) – КЭТО М (I_{AC})+МИО (I_{PC}); (б) – КЭТО (I_{DC})+МИО (I_{PC}); (в) – КЭТО (I_{PC})+МИО (I_{PC}); (г) – МИО (I_{PC}).

Проанализируем изменение во времени напряженности электрического (E) и магнитного (H) полей как в отдельности для каждого тока, так и при КЭТО+МИО. Для этого воспользуемся системой уравнений Максвелла для квазистационарного поля в дифференциальной постановке. Алгоритмы соответствующих расчетов выполнены с использованием программ метода конечных элементов [13, 16].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для того чтобы показать разницу в распределении анализируемых полей в точках визуализации, сравним данные отдельно для КЭТО и МИО с результатами их гибридизации (рис. 4–7).

Эти данные показывают анализируемые характеристики только в выбранных точках визуализации, но более информативным может быть результат, поясняющий трансформацию магнитного поля в объеме скин-слоя у поверхности ЖМС (рис. 8). Здесь представлено распределение функции $H(t)$ в сечении на глубине 1 мм от поверхности расплава, которое показывает влияние суперпозиции МИО+КЭТО на пространственно-числовые характеристики магнитного поля.

Полученные результаты дают основания для сравнительного анализа различных вариантов обработки ЖМС при гибридизации КЭТО+МИО.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В соответствии с выбранной для моделирования геометрической постановкой задачи (рис. 3) в результате расчетов получены следующие данные. Электрическое поле при КЭТО для разных типов тока рассредоточено во всем объеме ЖМС, но существенно неравноценно для AC и DC, и с максимальными амплитудными значениями у торцов электродов (точки Т1, Т4 на рис. 4а,б). Для РС при КЭТО электрическое поле окутывает в основном наружные области ЖМС, что вызвано эффектом скинирования (рис. 4в). При МИО электрическое поле практически полностью сосредоточено в скин-слое у поверхности ЖМС (рис. 4г). Рис. 5 показывает практически схожие результаты в формировании магнитного поля для AC, DC, PC, PC (МИО). В случае гибридизации КЭТО+МИО амплитудные значения электрического поля имеют практически тот же порядок, как и на рис. 4, но характер их изменения во времени для вариантов AC+МИО и DC+МИО существенно меняется в точке Т4 у поверхности ЖМС (рис. 6а,б). Здесь

происходит за счет электрического поля при МИО как бы «встряхивание» полей АС и DC с частотой $f = 1/T_и$. При этом в точке Т4 кривая $E(t)$ приобретает существенно нелинейный характер. В то же время при РС+МИО и амплитудные значения $E(t)$, и качественный вид этой зависимости практически не изменяются. Очевидно, это вызвано тем, что мы анализировали ситуацию при импульсных токах одинаковой частоты для КЭТО и МИО.

При действии только одного типа тока (АС, DC, РС, МИО) максимальные значения напряженности магнитного поля сосредоточены у поверхности ЖМС (рис. 5), а временные ее зависимости, как и для $E(t)$, коррелируют с изменением тока. Гибридизация же методов при обработке ЖМС существенно влияет как на характер изменения зависимости $H(t)$, так и на ее амплитудные значения практически во всех точках визуализации (рис. 7). Хотя у поверхности (точка Т2) они максимальны для всех типов тока. И если, как отмечалось, амплитудные значения $E(t)$ практически не изменяются, то для $H(t)$ их рост за счет гибридизации отмечен практически на порядок.

Если рассматривать последействие БЭМП на ЖМС, то нужно учесть его как термосиловое воздействие. И если действие электрического поля можно рассматривать в основном как тепловое, для которого мощность объемного тепловыделения пропорциональна E^2, то влияние магнитного поля ориентировано в основном на силовое воздействие, так как объемная сила, создаваемая неоднородным магнитным полем (градиент давлений), пропорциональна $\mu_0 \vec{H} \times \nabla \vec{H}$, где μ_0 – магнитная постоянная; ∇ – оператор набла.

Если КЭТО+МИО способны существенно увеличить давление у поверхности расплава, то этот факт показывает потенциальную возможность гибридизации существенно активировать действие акустического поля. При этом характер распределения H(t) в скин-слое у поверхности изменяется (рис. 8).

При обработке жидкометаллической системы БЭМП преследуется цель подготовки ее к кристаллизации. Одно из условий эффективности этой процедуры – формирование условий и факторов для образования центров кристаллизации во всем объеме расплава. Как известно, металлический расплав характеризуется ковалентной и металлической связями, а также соответствующими уровнями энергии межатомного взаимодействия, имеющими электромагнитную природу и подчиняющимися квантово-механическим законам. При этом химические свойства определяются в основном строением внешних электронных оболочек. Действия КЭТО и МИО также имеют электромагнитную природу, то есть они напрямую (не опосредованно) влияют на энергию межатомного взаимодействия. Условием его изменения при обработке может быть достаточная интенсивность воздействия, которая должна обеспечить усиление флуктуаций энергий в ЖМС за счет формирования существенно нелинейных зависимостей $E(x, y, z, t)$ и $H(x, y, z, t)$ при использовании КЭТО+МИО, вплоть до sp-гибридизации атомов ЖМС, которая изменит их активационную способность [17–20]. Выполненный в работе анализ изменения ЭМП для разных принципов обработки показал, что гибридизация КЭТО+МИО потенциально способна выполнить эту функцию.

Таким образом, в рамках выбранной постановки задачи на основе проведенных исследований при использовании КЭТО+МИО показана возможность существенного изменения амплитудно-частотных характеристик БЭМП в сторону усиления термосилового воздействия на структуру и свойства объекта обработки. Конечно же, этот результат требует дальнейших исследований как методами имитационного моделирования, так и методами физического эксперимента.

ВЫВОДЫ

1. В рамках выбранной постановки задачи численным экспериментом показано, что суперпозиция электромагнитных полей в жидкометаллической системе при кондукционной и магнитно-импульсной обработке может обеспечивать более интенсивное влияние на структуру и свойства объекта обработки, чем каждый из этих методов отдельно.

2. Интенсификация воздействия базового электромагнитного поля на жидкометаллическую систему при использовании КЭТО+МИО характеризует все выбранные для анализа пары типов токов: АС, DC, РС+РС (МИО), но с разной степенью потенциальной эффективности термосилового воздействия. Реальное же последействие суммарного базового электромагнитного поля может показать только физический эксперимент.

3. В силу физических особенностей базового электромагнитного поля для КЭТО и МИО генезис их суперпозиции в основном сосредоточен в объеме скин-слоя у поверхности расплава. При этом временные зависимости напряженностей электрического и магнитного полей приобретают существенно нелинейный характер, что усиливает эффекты флуктуации

энергии. Амплитудные значения $H(t)$ возрастают практически на порядок, соответственно увеличивая величины магнитного давления.

4. Результаты имитационного моделирования подтвердили инновационную перспективу для литейного производства предложенной новации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубодєлов, В.І., Горюк, М.С., Застосування електромагнітних полів і магнітогідродинамічних явищ для інтенсифікації впливу на металеві системи: світовий та український досвід. Лобанов, Л.М., Туркевич, В.З., Анатичук, Л.І. та ін. *Наука про матеріали: досягнення та перспективи*. Київ: Академперіодика, 2018, с. 24.
2. Цуркін, В.М., Петриченко, С.В., Садовий, О.С., Проблематика методології досліджень процесів і явищ при енергетичній обробці рідкометалевої системи, *Збірник наукових праць* НУК, 2024, № 4, с. 124.
   https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).18
3. 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.
4. Prigunova, A.G., Koshelev, M.V. and Borisov, A.G., Effect of unipolar pulsed electric current treatment of the melt of Al – 8 wt-% Si – 0.7 wt-% Fe alloy on iron-containing phases formation and mechanical properties of castings, *Mater. Sci. Technol.*, 2022, vol. 38, p. 246.
   https://doi.org.10.1080/02670836.2022.2037059
5. Balasubramani, N., Xu, Y., Zhang, Y., Zhai Q., et al., Investigating the grain refinement mechanisms of pulsed electric current, ultrasonic and melt stirring solidification of pure aluminium, *JOM*, 2021, vol. 73, p. 3873.
   https://doi.org/10.1007/s11837-021-04904-7
6. Liang, C.-L. and Lin, K.-L., The microstructure and property variations of metals induced by electric current treatment: A review, *Mater. Charact.*, 2018, vol. 145, p. 545.
   https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.058
7. Balasubramani, N., Venezuela, J., StJohn, D., Wang, G., et al., A review of the origin of equiaxed grains during solidification under mechanical stirring, vibration, electromagnetic, electric-current, and ultrasonic treatments, *J. Mater. Sci. Technol.*, 2023, vol. 144, p. 243.
   https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.09.067
8. Jee Seok Choi, Moonwoo La, Dong Eung Kim, Kyeong-Hwan Choe, et al., Effect of electric current on the microstructural refinement of pure aluminum, *J. Mater. Res. Technol.*, 2021, vol. 12, p. 818. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.040
9. Guo, J., Wang, F., Zhang, S., Zhou, Y., et al., Effect of high-frequency electric pulse on the solidification micro-structure and properties of hypoeutectic Al-Si alloy, *Materials*, 2024, vol. 17, no. 2, art. ID:468.
   https://doi.org/10.3390/ma17020468
10. Choi, S.J., Kim, D., La, M. and Kim, M.J., Effect of cavity shape on microstructural evolution of pure aluminum in electrically-assisted solidification, *Sci. Rep.*, 2023, vol. 13, art. ID 3382.
    https://doi.org/10.1038/s41598-023-29522-y
11. Eskin, D.G. and Jiawei, M., *Solidification Processing of Metallic Alloys under External Fields*. Cham: Springer Series in Materials Science, 2018. 320 p.
    https://doi.org/10.1007/978-3-319-94842-3
12. Wang, G., Dargusch, M., Easton, M. and StJohn, D., Treatment by External Fields. *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*. Lumley, R. N. (Ed). Sawston: Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering. 2018, p. 279.
13. Tsurkin, V.M., Ivanov, A.V., Zaporozhets, Yu.M., Zhdanov, O.O., et al. Multivariant method of conductive electric current treatment of molten metal, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, vol. 60, p. 31.
    https://doi.org/10.3103/S1068375524010150
14. Ivanov, A.V., 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, p. 327.
    https://doi.org/10.3103/S1068375520030072
15. Kosenkov, V.M. and Ivanov, A.V., Formation of wave fields in a metal melt under the action of magnetic-pulse loading and discharge current pulses, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2024, vol. 60, p. 838.
    https://doi.org/10.3103/S1068375524700443
16. *Properties and Selection of Aluminum Alloys.* Anderson, K., Weritz, J., Kaufman, J.G. (eds.). ASM Handbook, Vol. 2B. Materials Park: ASM International, 2019. 636 p.
    https://doi.org/10.31399/asm.hb.v02b.9781627082105
17. 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. 8, art. ID 3242.
    https://doi.org/10.1038/s41598-018-21709-y
18. Haken, H and Portugali, J., Information and self-organization II: Steady state and phase transition, *Entropy*, 2021, vol. 23, no. 6.
    https://doi.org/10.3390/e23060707
19. Ковальчук, А.А., Гусак, А.М., Тютюнник, Н.В., Малый, А.И., Получение неравновесных состояний сплавов под воздействием импульсного нагружения, *Металлофизика и новейшие технологии*, 2009, т. 31, № 2, с. 209.

20. Räbiger, D., Zhang, Y., Galindo, V, Franke, S., et al., Experimental study on directional solidification of Al-Si alloys under the influence of electric currents, *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.*, 2016, vol. 143, art ID 012021.

https://doi.org/10.1088/1757-899X/143/1/012021

Summary

The study addresses the modeling of the characteristics of electric and magnetic fields generated simultaneously through conduction, by directly passing current through the melt using electrode current leads, and induction, using an external inductor positioned above the surface of the melt. This hybrid method of energy treatment for a liquid metal system implements a complex superposition of electromagnetic fields, which determines the parameters of the thermal-force impact on the treated object. The functional capabilities of this method were analyzed through numerical experiments using simulation modeling. The obtained results demonstrated potential treatment modes capable of actively enhancing the incubation processes of crystallization, which ultimately allows for the find conditions for improving the structure and properties of the cast metal. Thus, the combination of simultaneous conductive and inductive current treatment modes consistently led to a stronger impact on the liquid metal system compared to applying them separately. It was found that the genesis of the electromagnetic field superposition is mainly concentrated within the skin layer near the melt surface. The temporal characteristics of the electric and magnetic fields become nonlinear, which amplifies energy fluctuations within the system. At the same time, the amplitude values of the combined electromagnetic field characteristics increase by almost an order of magnitude, significantly enhancing the integral amplitude of the force impact on the melt. Thus, the simulation modeling results confirmed the innovative potential of the hybrid method of treating the melt simultaneously with conduction and induction currents for foundry applications.

Keywords: liquid metal system, simulation modeling, energy treatment, conductive current, induced current, electromagnetic field hybridization, electromagnetic field genesis