Особенности распределения электромагнитного поля в металлическом расплаве при его комбинированной электротоковой и магнитно-импульсной обработке

Н. В. Честных, А. В. Иванов*

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

Поступила в редакцию 10.10.2025
После доработки 23.02.2026
Принята к публикации 26.02.2026

Исследованы особенности распределения электромагнитного поля и силового нагружения в расплаве при его совместной электротоковой и магнитно-импульсной обработке в частотных режимах. Показано, что при частотах тока до 5 кГц вихревые поля охватывают практически весь объем расплава. Увеличение частоты до 25 кГц и выше приводит к их концентрации в приповерхностных и пристеночных зонах. Установлено, что с повышением частоты тока происходит монотонное возрастание напряженности электрического поля. Показано, что, несмотря на существенно неравномерное распределение электромагнитных полей на высоких частотах, обеспечивается относительно высокий показатель равномерности обработки от 1 при 5 кГц до 0,45 при 200 кГц. При этом обеспечивается стабильное интегральное силовое воздействие на весь объем расплава при одновременном росте максимума плотности электромагнитной силы более чем в два раза с ростом частоты тока.

Ключевые слова: электротоковая обработка, магнитно-импульсная обработка, расплав, электромагнитное поле, частота тока, силовое нагружение

УДК 537.528: 669.017.16
https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.1.19

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время общая проблема литейного производства, заключающаяся в обеспечении высоких показателей качества литых изделий с учетом приемлемых соотношений в системе «цена-качество» для производителя и покупателя, не имеет универсальных методов решения. По этой причине для каждого конкретного технологического процесса в рамках системы «шихта-расплав-отливка» используют соответственно адаптированный комплекс технических средств и методов обработки расплава для повышения его положительной кристаллизационной способности с учетом современных требований производства [1, 2]. Методы обработки расплава делятся на реагентные и энергетические. Первые применяют малые дозы различных химических элементов, а их действие является избирательным и дает возможность обеспечить только отдельные результаты воздействия. Вторые используют для воздействия на расплав различные физические поля, действие которых является интегральным и многоцелевым. Наиболее известны в этом плане вибрационные методы [3, 4], электромагнитные [5–7], термические [8].

К энергетическим электромагнитным методам также относятся относительно новые методы кондукционной электротоковой (КЭТО) [9] и магнитно-импульсной обработки (МИО) расплава [10]. В случае КЭТО обработка производится с помощью специальной электродной системы, которая помещается непосредственно в расплав, при этом в течении определенного времени через жидкий металл пропускается электрический ток [9, 10].

Магнито-импульсная обработка предполагает воздействие на жидкий металл с помощью специального индуктора, который находится на небольшом расстоянии над поверхностью расплава и через который пропускают переменный или импульсный ток с заданными параметрами [10].

Хотя оба метода доказали свою эффективность при индивидуальном применении, одновременное использование КЭТО и МИО может приводить к положительному воздействию на кристаллизационную способность расплава. За счет того, что электромагнитное нагружение током будет осуществляться на фоне электромагнитного и акустического воздействия от магнитно-импульсной обработки, следует ожидать, что суммарное термосиловое воздействие потенциально сможет в локальных зонах расплава образовывать более интенсивные флуктуации энергии. Как показал опыт электротоковой обработки, такие параметры, как частота

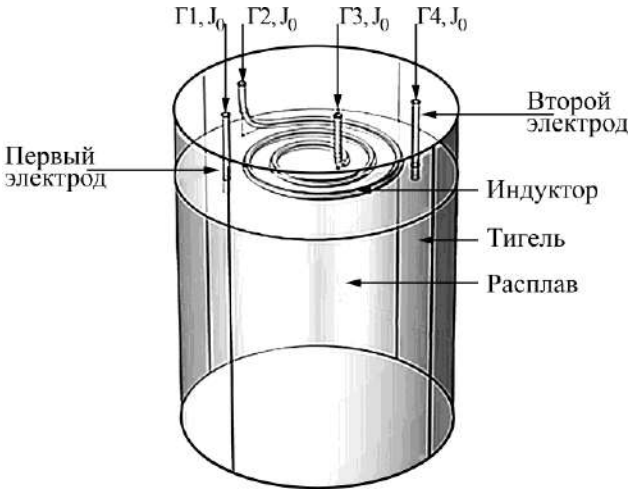


Рис. 1. Геометрия задачи.

тока и период импульса тока, являются одними из ключевых факторов, которые непосредственно участвуют в формировании электромагнитного поля в объеме расплава, и, как следствие, термосилового воздействия на обрабатываемый металл [11, 12].

Поэтому актуальной научной задачей является исследование особенностей распределения этих полей в объеме расплава при его совместной электротоковой и магнитно-импульсной обработке с учетом частоты тока или же частоты посылки и собственной частоты импульсов тока. Однако, как показано в [11], для качественного и количественного анализа сценариев развития термосиловых процессов, в том числе при трехмерном моделировании, допустимо на первом этапе проведения численных исследований и при построении имитационных моделей ограничиться рассмотрением воздействия гармонического синусоидального тока в частотном режиме. Это обусловлено тем, что при разложении импульсных токов в ряд Фурье в их спектре всегда присутствует основная (несущая) гармоническая составляющая, которая вносит определяющий вклад в формирование полей. Кроме того, применение синусоидального тока существенно упрощает численные алгоритмы и расчетные процедуры.

Цель работы – методами математического моделирования исследовать особенности распределения характеристик электромагнитных и силовых полей в объеме расплава алюминиевого сплава при его совместной электротоковой и магнитно-импульсной обработке в частотных режимах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе рассматривается цилиндрическая емкость с алюминиевым расплавом диаметром 200 мм, высотой 200 мм, в которую заглубляются на 10 мм параллельно, на расстоянии 95 мм, два титановых электрода. Диаметр электродов составляет 6 мм. На расстоянии 6 мм над поверхностью расплава расположен спиральный индуктор диаметром 6 мм и количеством витков 2,5 (рис. 1).

Моделирование распределения электромагнитного поля в жидком металле производится с помощью численного решения уравнений Максвелла методом конечных элементов с заданными граничными условиями для условий квазистационарного поля.

$$\left.\begin{aligned} &\nabla \times H = J = \sigma(E + v \times B) + J^e, \\ &\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \\ &\nabla \times B = 0, \\ &\nabla \times D = 0, \\ &\nabla \times J = 0. \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где ∇ – оператор набла; H – напряженность магнитного поля в расплаве, А/м; J – плотность тока, А/м^2; σ – удельная электрическая проводимость, См/м; E – напряженность электрического поля в расплаве, В/м; V – скорость расплава, м/с; B – индукция магнитного поля в расплаве, Тл; J_e – плотность наведенных токов, А/м^2; D – электрическая индукция, Кл/м.

Расчеты производились для гармонически изменяющегося электромагнитного поля методом конечных элементов [11–14]. Диапазон частот был выбран от 50 до 200 кГц [5, 12, 13]. В качестве объекта обработки брали расплав литейного алюминиевого сплава при температуре 700 °С с удельной электрической проводимостью $\sigma_{распл}$ = 3,8×10^6 См/м, материал электродов для КЭТО – титан, удельная электрическая проводимость которого при этой температуре $\sigma_{эл}$ = 6,6×10^5 См/м, материал индуктора – медь с удельной электрической проводимостью

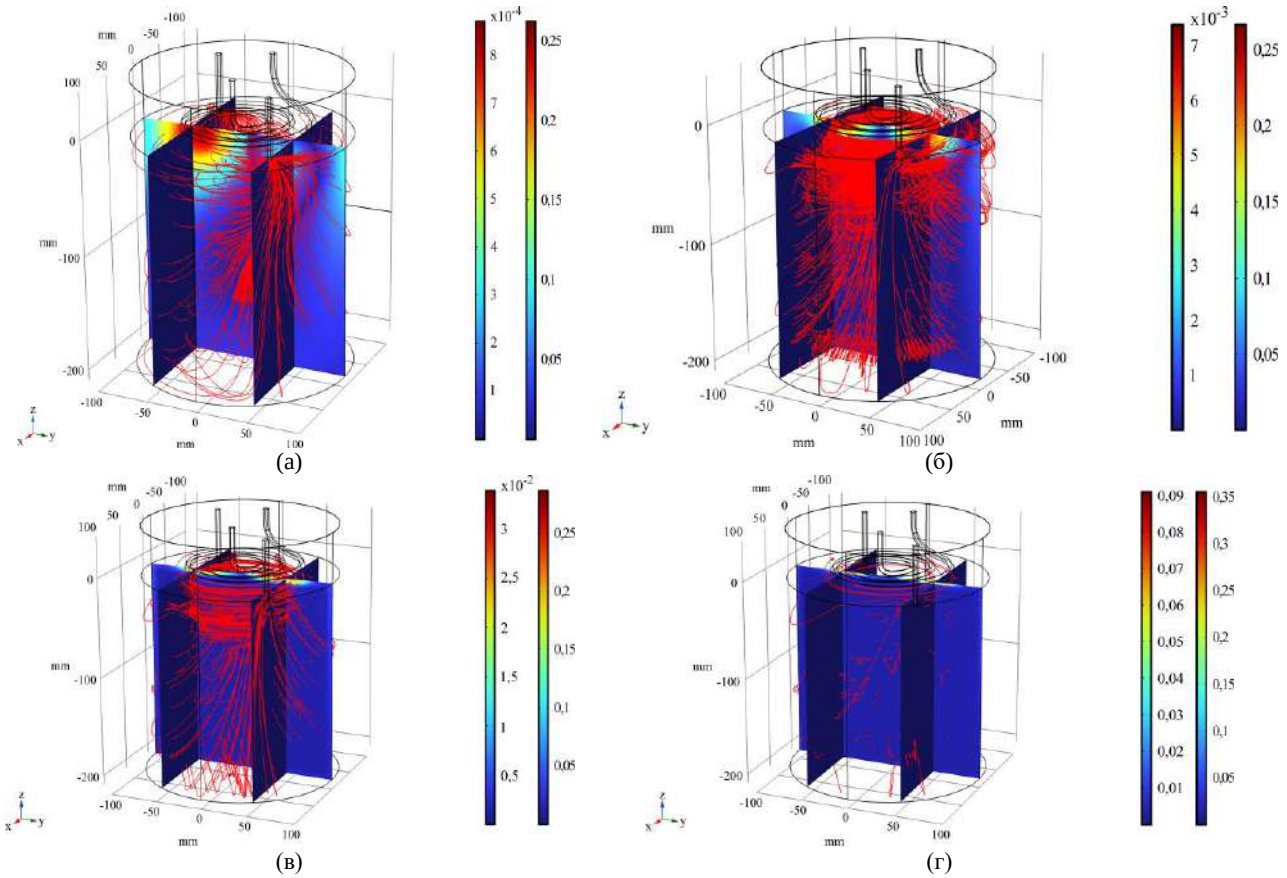


Рис. 2. Распределение электрического поля в расплаве при совместной КЭТО и МИО: (а) – 50 Гц; (б) – 500 Гц; (в) – 5000 Гц; (г) – 25000 Гц.

$\sigma_{инд}$ = 5,8×10^7 См/м. Начальные и граничные условия для электромагнитной задачи:

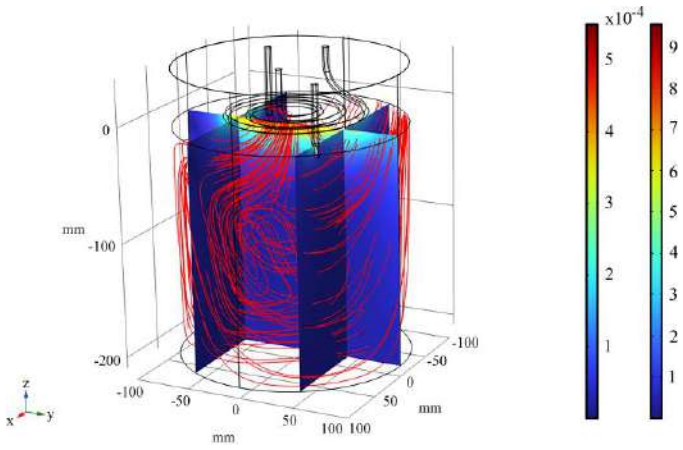
1. Вход тока (верхнее сечение первого электрода Г1, верхнее сечение индуктора Г2) – распределение плотности тока J_0. 2. Выход тока (верхнее сечение второго электрода Г3, верхнее сечение индуктора Г4) – распределение плотности тока J_0. 3. Токовая изоляция (стенки емкости с расплавом и верхняя поверхность расплава, поверхность индуктора), нулевой градиент плотности электрического тока нормали к стенке. 4. Магнитная изоляция (наружный слой воздуха) – плотность магнитного потока равна нулю.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

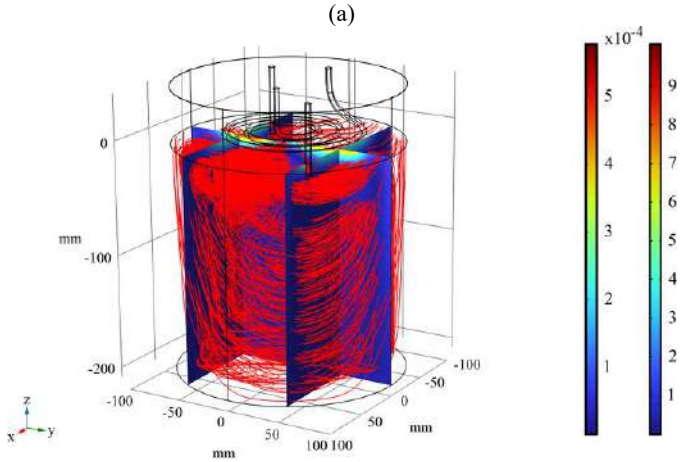
На рис. 2 приведено распределение электрического поля в расплаве, а на рис. 3 – магнитной индукции при совместной КЭТО и МИО расплава при частоте тока 50, 500, 5000, 25000 Гц.

Как видно из приведенных на рис. 1 и 2 качественных распределений электрического и магнитного полей, их пространственное распределение сильно неравномерно даже при промышленной частоте 50 Гц. Также полученные нами данные в режиме 3*D* дают нам возможность непосредственно наблюдать (визуализировать) изменение полей в пространстве из-за явления скин-эффекта. Так, на рис. 2б,в и 3б,в хорошо видно вторичные поля генерируемые (индуцированные) суперпозицией первичных (базовых) электрического и магнитного полей КЭТО и МИО. При увеличении частоты (рис. 2в, 3в) наблюдается вытеснение поля к границам емкости с расплавом и свободной поверхности. Что, соответственно, позволяет говорить о концентрации там первичных и вторичных электромагнитных полей, электромагнитной силы и джоулева тепла. Это, в свою очередь, дает возможность, целенаправленно воздействовать на определенные зоны расплава, изменяя частоту тока и не изменяя конструкционно-электродную и индукторные системы. Такой подход существенно расширяет функциональные возможности регулирования процессом обработки.

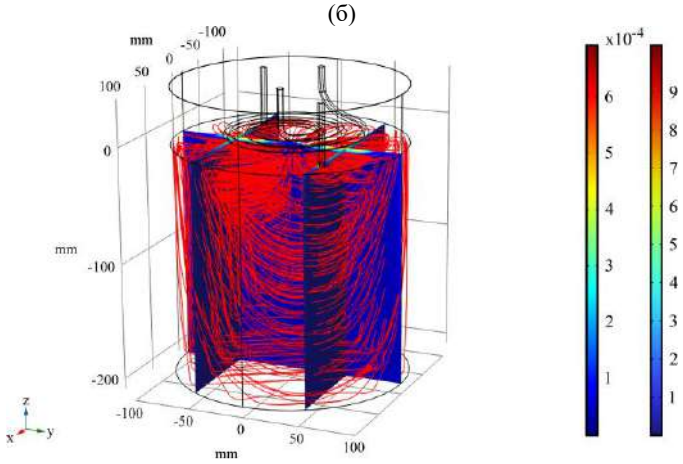
Проиллюстрируем на примере распределения характеристик электромагнитного поля и силового нагружения их изменение в



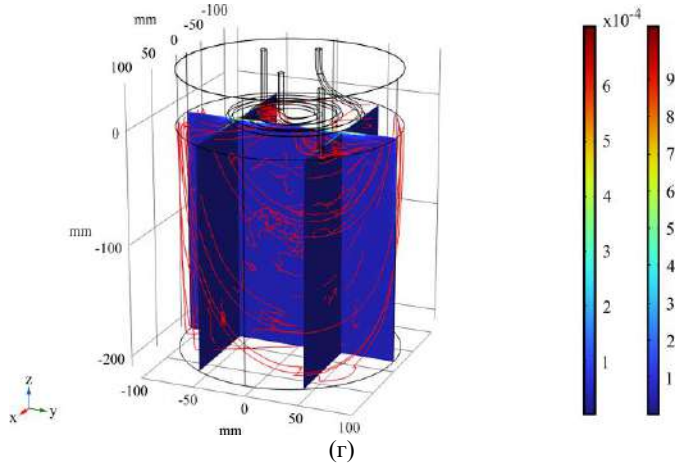
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 3. Распределение магнитного поля в расплаве при КЭТО и МИО расплава: (а) – 50 Гц; (б) – 500 Гц; (в) – 5000 Гц; (г) – 25000 Гц.

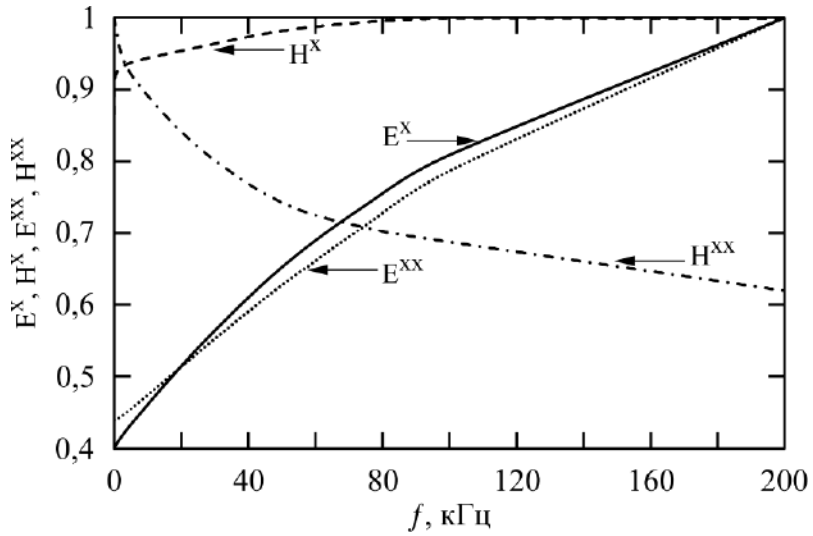


Рис. 4. Частотные зависимости относительных значений напряженности электрического (E^x) и магнитного (H^x) полей для гибридного метода КЭТО+МИО, а также электрического (E^{xx}) и магнитного (H^{xx}) полей для метода КЭТО.

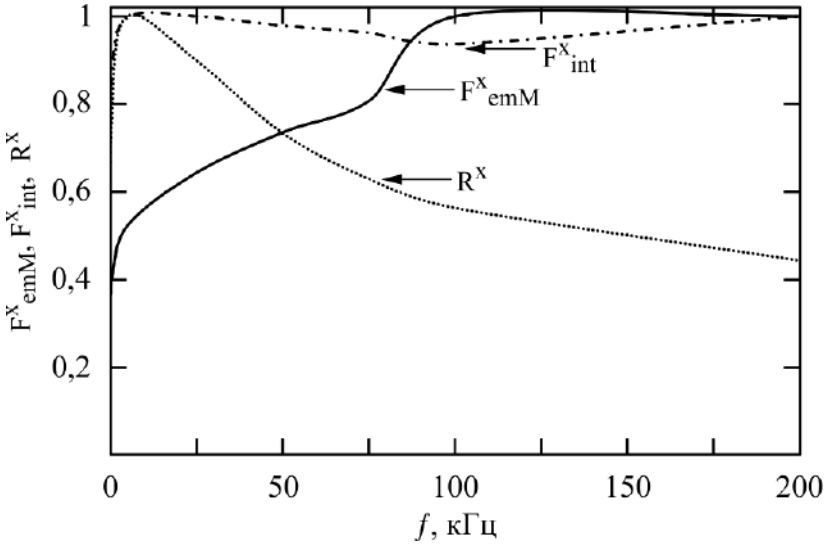


Рис. 5. Относительные значения максимума плотности электромагнитной силы F^x_{emM}, интеграла плотности электромагнитной силы F^x_{int} в объеме расплава, параметра равномерности R^x в зависимости от частоты тока для КЭТО+МИО.

зависимости от частоты. Результаты численных расчетов приведены на рис. 4 и 5.

На рис. 4 приведено распределение от частоты тока максимальных по модулю относительных значений напряженности электрического (E^x) и магнитного (H^x) полей для гибридного метода КЭТО+МИО, а также электрического (E^{xx}) и магнитного (H^{xx}) полей для метода КЭТО.

Как следует из данных, приведенных на рис. 4, кривые напряженности электрического поля E^x и E^{xx} практически совпадают, поскольку формирование поля определяется преимущественно током, который непосредственно пропускается через расплав с помощью электродов-токоподводов при КЭТО. Кривая E^x имеет несколько более выраженную выпуклость по сравнению с E^{xx}, что может быть связано с влиянием электрического поля, наведенного индуктором. Относительные их значения возрастают более чем в два раза с увеличением частоты до 200 кГц в сравнении с начальным значением при частоте 50 Гц. Причиной этого является увеличение степени концентрации электрического поля в приповерхностных областях емкости с расплавом вследствие скин-эффекта. Вместе с тем при КЭТО с использованием электродов с неизолированной боковой поверхностью, как в данном случае, величина напряженности магнитного поля H^{xx} падает, поскольку при резко выраженном на высоких частотах скин-эффекте уменьшается область поверхности, которую пронизывает поток магнитного поля. Этот факт, конечно же, должен сказываться на результирующем силовом воздействии на расплав, несмотря на то что уменьшение H^{xx} частично компенсируется повышением E^{xx}. При КЭТО+МИО суперпозиция их магнитных полей компенсирует эффект уменьшения напряженности магнитного

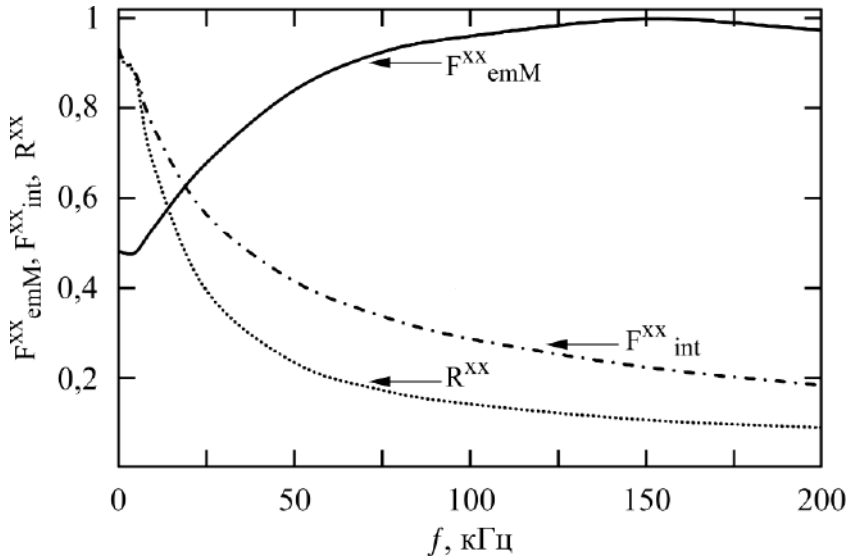


Рис. 6. Относительные значения максимума плотности электромагнитной силы F^{xx}_{emM}, интеграла плотности электромагнитной силы F^{xx}_{int} в объеме расплава, параметра равномерности R^{xx} в зависимости от частоты тока для КЭТО.

поля H^x (рис. 4). Интенсивный рост кривой H^x наблюдается при частотах порядка сотен герц. Начиная приблизительно с 2 кГц рост H^x становится более плавным. Значение напряженности магнитного поля H^x при частоте тока порядка 100 кГц достигает максимума и далее, с увеличением частоты вплоть до 200 кГц, значение величины напряженности магнитного поля не меняется. То есть можно сказать, что кривая $H^x(f)$ достигает своего насыщения. Данное обстоятельство должно существенно повлиять на стабильность воздействия с увеличением частоты тока.

На рис. 5 и 6 приведены частотные зависимости относительных значений максимума плотности электромагнитной силы F_{emM}, интеграл плотности электромагнитной силы F_{int} в объеме расплава (V), а также коэффициент равномерности R, который определяется как $R = F_{int}/(F_{int} \times V)$ для КЭТО+МИО и КЭТО соответственно. Здесь F_{int} характеризует суммарную силу или энергию, которая вводится в обрабатываемый металл, F_{emM} отвечает за точки высоких локальных градиентов скорости и возможной локальной турбулизации, коэффициент R показывает характер электромагнитного воздействия, то есть насколько равномерно электромагнитная сила распределена по всему объему расплава. Анализируя зависимости, приведенные на рис. 5 и 6, можно сказать, что $F_{int}(f)$ для гибридного метода КЭТО+МИО (см. рис. 5) остается близкой к своему максимальному значению в рассматриваемом диапазоне частот. Однако на частоте 100 кГц существует провал, и он составляет примерно 10% от максимума. Это совпадает с максимумом зависимости $H^x(f)$ (см. рис. 4) и, вероятнее всего, связано с пространственно-фазовым взаимодействием электромагнитных полей, генерируемых токами, вводимыми в расплав через электроды и наведенными от индуктора при данной частоте.

Кривая $F^x_{emM}(f)$ возрастает немонотонно и имеет выраженный изгиб на 75 кГц. Максимума она достигает в диапазоне 100–150 кГц, с пиком на 125 кГц, после чего начинается плавное убывание. Кривая коэффициента равномерности $R^x(f)$ сначала резко возрастает до 5 кГц, а затем монотонно убывает до значения примерно 45% от максимума. Несмотря на это, значения F^x_{emM} и F^x_{int} в данном диапазоне частот остаются высокими, а F^x_{emM} увеличивается более чем в два раза, что должно компенсировать снижение неравномерности воздействия и способствовать турбулизации процессов в локальных зонах. Это позволяет со значительной долей уверенности говорить о большом потенциале гибридного подхода для эффективного воздей ствия на весь объем расплава с реализацией направленных локальных силовых воздействий. В случае КЭТО кривые R^{xx} и F^{xx}_{int} монотонно убывают во всем рассматриваемом частотном диапазоне, достигая соответственно 10 и 20% от своих максимальных значений. Лишь на частотах до 5 кГц наблюдаются небольшие искажения. F^{xx}_{em}, напротив, увеличивается с ростом частоты, достигая максимума на 150 кГц, после чего начинается его плавное снижение.

В целом можно заключить, что гибридный метод КЭТО+МИО для обработки расплавов предоставляет широкие возможности регулирования процессом энергетического воздействия на расплав с помощью частоты. Так, по сравнению с КЭТО, реализуемой с использованием электродов с неизолированной боковой

поверхностью, добавление внешнего магнитно-импульсного воздействия позволяет за счет регулирования частоты стабилизировать его в объеме расплава и более чем в два раза повысить интенсивность как локального, так и общего силового воздействия.

ВЫВОДЫ

1. В ходе численного моделирования в 3*D*-постановке с применением методов имитационного моделирования выявлены особенности распределения электромагнитного поля и силового нагружения в расплаве при совместной кондукционной электротоковой и магнитно-импульсной обработке в различных частотных режимах.

2. Полученные трехмерные распределения электрического и магнитного полей показывают, что при частотах до 5 кГц первичные и вторичные вихревые поля охватывают практически весь объем расплава. При увеличении частоты до 25 кГц и выше наблюдается концентрация полей в приповерхностных и пристеночных зонах. Это свидетельствует о неравномерном перераспределении термосилового воздействия и открывает возможность для разработки гибких алгоритмов управления обработкой.

3. Анализ гибридного метода комплексной кондукционной электротоковой и индукционной магнитно-импульсной обработки показал, что даже при неравномерном распределении электромагнитных полей на средних и высоких частотах токов обеспечивается относительная равномерность обработки: от 1 при 5 кГц до 0,45 при 200 кГц. При этом суммарное силовое воздействие на расплав сохраняется практически на одном уровне за счет локального увеличения плотности электромагнитной силы, которая возрастает более чем в два раза с ростом частоты. Это способствует компенсации возникающей неравномерности воздействия и формированию локальных зон турбулентности в расплаве, что, в свою очередь, создает условия для обеспечения необходимого результата кристаллизации.

4. Таким образом, предложенный гибридный метод обработки создает возможности для регулирования характеристик энергетического воздействия на расплав в широких пределах. Это позволяет подбирать рациональные режимы обработки по критерию «цена-качество» и способствует получению благоприятной структуры и повышенных свойств литого металла. Метод может быть эффективно адаптирован к современным технологиям литья и представляет инновационную привлекательность для литейного производства.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kozlowsky, J., Sika, R., Górski, F. and Ciszak, O., Modeling of foundry processes in the era of industry 4.0. In: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing, Proc. Int. Conf. on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2019*. (Ivanov, V., Rong, Y., Trojanowska, J., et al., Eds.). Springer, 2019. 934 p.
2. Nuradinov, A., Nogovitsyn, A., Nuradinov, I., Zubenina N., et al., Innovative ways to control the process of forming the crystal structure of metal alloys, *Sci. Innov.*, 2020, vol. 16, no. 4, p. 67. https://doi.org/10.15407/scine16.04.067.
3. Selivorstov, V., Dotsenko, Y. and Borodianskiy, K., Influence of low-frequency vibration and modification on solidification and mechanical properties of Al-Si casting alloy, *Materials*, 2017, vol. 10, no. 5, art. ID 560. https://doi.org/10.3390/ma10050560
4. Jaime, R.F., Puga, H., Prokic, M., et al., Fundamentals of ultrasonic treatment of aluminum alloys, *Int. J. Metalcast.*, 2024, vol. 18, p. 2783. https://doi.org/10.1007/s40962-023-01253-w
5. Eskin, D.G. and Jiawei, M., *Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields*. Cham: Springer, 2018. 320 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94842-3
6. Ban, C.-Y., Ba, Q.-X., Zhu, L.-Y. and Cui, J.-Z., Influences of an alternate magnetic field on the liquidus and solidus temperatures of 7075 Al alloy, *J. Northeast. Univ.*, 2003, vol. 24, no. 5, p. 482.
7. Narivsky, A.V., Smirnov, O.M., Panarin, V.E., Skorobagatko, Yu.P., et al., Influence of MHD − plasma melt processing on the structure and properties of cast aluminum alloy A390, *Met. Sci. Treatm. Met.*, 2021, vol. 27, no. 4, p. 24. https://doi.org/10.15407/mom2021.04.024
8. Смірнов, О.М., Березіна, А.Л., Монастирська, Т.О., Фікссен, В.М., та ін., Особливості легування та термічного оброблення високоміцних ливарних алюмінійово-мідних стопів, *Металофізика та новітні технології*, 2024, т. 46, с. 559. https://doi.org/10.15407/mfint.46.06.0559
9. 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. 1. https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2037059

10. Tsurkin, V.N., Ivanov, A.V., Cherepovskii, S.S., et al., Comparative analysis of functional possibilities of methods of pulse treatment of a melt, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2016, vol. 52, p. 181.

https://doi.org/10.3103/S1068375516020149

11. Ivanov, A.V. and Chestnykh M.V., Three-dimensional modeling of electromagnetic field distribution and force action characteristics during conductive electric current treatment of melts in frequency modes, *Electromech. Energy Saving Systems*, 2024, no. 2, p. 8.

https://doi.org/10.32782/2072-2052.2024.2.65.1

12. Meunier, G., *The Finite Element Method for Electromagnetic Modeling*. London: ISTE Ltd, 2008. 606 p.

13. Ivanov, A.V. and Tsurkin, V.N., Peculiarities of distribution of electromagnetic and hydrodynamic fields for conductive electric current treatment of melts in different modes, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 55, no. 1, p. 53.

https://doi.org/10.3103/S1068375519010101

14. 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. Reports*, 2018, vol. 8, art. ID 3242.

https://doi.org/10.1038/s41598-018-21709-y

Summary

The paper deals with the investigation of the distribution of the electromagnetic field and force loading in the melt under a combined electric current and magnetic pulse treatment in frequency modes. It is shown that at current frequencies up to 5 kHz, the eddy fields cover almost the entire volume of the melt. Increasing the frequency to 25 kHz and above leads to their concentration in the near-surface and near-wall zones. It is established that an increase in the current frequency results is a monotonic rise in the electric field strength. The magnetic field strength increases abruptly, reaching about 90% of its peak value, and then the maximum at a frequency of 100 kHz. Further, the curve enters the saturation mode. It is shown that despite a significantly uneven distribution of electromagnetic fields at high frequencies, a relatively high uniformity index is ensured, ranging from 1 at 5 kHz to 0.45 at 200 kHz. At the same time, a stable integral force effect is exerted on the entire volume of the melt, while the peak electromagnetic force density increases by more than two times with increasing current frequency. The data obtained in the work show that the proposed method of joint processing provides wide-range regulation of the characteristics of the energy impact on the melt, which, ultimately, will make it possible to find conditions for obtaining a favorable structure and improved properties of cast metal that are rational in terms of the price-quality ratio. This should ensure its adaptability to modern technological processes for obtaining castings and its innovative appeal.

Keywords: electric current treatment, magnetic pulse treatment, melt, electromagnetic field, current frequency, force loading