

УДК 621.3:519.876.5:621.745.56
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).15](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).15)

FEATURES OF THE DISTRIBUTION OF THERMAL-FORCE IMPACT CHARACTERISTICS ON A LIQUID METAL SYSTEM WHEN APPLYING A SUPERPOSITION OF DIRECT AND PULSED CURRENTS

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОСИЛОВОГО ВПЛИВУ НА РІДКОМЕТАЛЕВУ СИСТЕМУ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ СУПЕРПОЗИЦІЇ ВИПРЯМЛЕНОГО ТА ІМПУЛЬСНОГО СТРУМІВ

Artem V. Ivanov¹
artiomsan@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3247-6121
Serhii V. Petrychenko¹
petrichsergey@gmail.com
ORCID: 0009-0000-1506-5219
Oleksiy S. Sadovoy²
sadvuyos@mnaeu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-7369-0714

А. В. Іванов¹,
канд. техн. наук, ст. наук. співр.
С. В. Петриченко¹,
канд. техн. наук, пров. наук. співр.
О. С. Садовий²,
канд. техн. наук, доцент

¹*Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Science of Ukraine, Mykolaiv*

²*Mykolayiv National Agrarian University, Mykolaiv*

¹*Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, м. Миколаїв*

²*Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв*

Abstract. The principle of the method of conductive electric current treatment is that an electric current of any type is passed through the melt using electrodes: constant amplitude (CC), constant sign (rectified) (DC), alternating (AC), pulsed (PC). Traditionally, a single power source and a pair of electrodes are used. Recent publications have shown very attractive prospects for the use of simultaneous processing with several currents using different electrode systems in foundries. In this case, there can be several dozen such combination options, so it is called multivariate. In this regard, the problem of expanding scientific understanding of its application is relevant, primarily by studying the characteristics of the electromagnetic field generated by this process, which ensures the formation of secondary fields – acoustic, thermal, and flow fields. Their integrated effect has the potential to change the thermodynamic state of the liquid-metal system so that during pouring and crystallization, the quality of the casting is improved at the finish line. *Purpose of the work.* To determine the peculiarities of the distribution of the characteristics of thermal force influence on a liquid-metal system when using the superposition of DC and PC by means of simulation modeling for 2D format in the meridional and azimuthal formulation.

Method. To study the processes in a metal melt during its conductive electric current treatment with direct and pulsed currents separately, as well as their combination, we used the finite element simulation of the Maxwell, Navier-Stokes, and Fourier equations in the meridional and azimuthal formulations.

Results. The obtained data showed a significant effect of the current frequency on the nature of the time variation of the studied characteristics. It is shown that the most active thermo-force impact is observed in the superposition of pulsed and rectified currents, which is used to realize significantly nonlinear oscillatory processes of thermo-force loading in a liquid-metal system.

Key words: conductive electric current treatment; melt; aluminum-silicon alloy; electromagnetic field; thermal-force impact; modeling.

Анотація. Принцип методу кондукційної електрострумової обробки полягає у тому, що через розплав за допомогою електродів пропускають електричний струм будь-якого типу: постійний по амплітуді (CC), постійний по знаку (випрямлений) (DC), змінний (AC), імпульсний (PC). Традиційно використовують одне джерело живлення та пару електродів. Останні публікації показали дуже привабливі перспективи до застосування у ливарному виробництві одночасної обробки декількома струмами із застосуванням різних електродних систем. При

цьому таких варіантів сполучення може бути декілька десятків, тому його названо поліваріантним. З цього приводу актуальною постає проблема розширення наукових уявлень щодо його застосування, у першу чергу за допомогою дослідження характеристик електромагнітного поля, яке при цьому генерується і яке забезпечує формування вторинних полів – акустичного, теплового та поля течії. Саме їх інтегральна дія потенційно спроможна змінювати термодинамічний стан рідкометалевої системи так, щоб при розливанні та кристалізації забезпечити на фінішній ланці покращення показників якості виливка. *Мета роботи.* Методами імітаційного моделювання для 2D формату у меридіальній та азимутальній постановці визначити особливості розподілу характеристик термосилового впливу на рідкометалеву систему при застосуванні суперпозиції DC та PC.

Методика. Для дослідження процесів у металевому розплаві при його кондукційній електрострумовій обробці окремо постійним та імпульсним струмами, а також їх комбінацією застосовано імітаційне моделювання методом скінчених елементів системи рівнянь Максвелла, Нав'є-Стокса, Фур'є у меридіональній та азимутальній постановках.

Результати. Отримані дані показали значний вплив частоти струмів на характер зміни у часі характеристик, що досліджувались. Показано, що найактивніший термосиловий вплив притаманний саме суперпозиції імпульсного та випрямленого струмів, за допомогою якого у рідкометалевій системі реалізуються суттєво нелінійні коливальні процеси термосилового навантаження.

Ключові слова: кондукційна електрострумова обробка; розплав; алюмінієво-кремнієвий сплав; електромагнітне поле; термосиловий вплив; моделювання.

ВСТУП

Як відомо, рідкометалева система (РМС) розплаву є відкритою, багатопараметричною та багатфункціональною з ознаками мультифізичності [1, 2]. Навіть в ситуації природного стану (in situ) в її об'ємі (за умов відсутності термостатування) відбуваються неоднорідні, флуктуаційні термодинамічні процеси перенесення матерії та тепла. За умов зовнішнього енергетичного навантаження РМС полями різної фізичної природи процеси та механізми суттєво ускладнюються. Тому адекватний їх аналіз в такій погано визначеній системі спікається з великими проблемами, що будуть ускладнювати як постановку комплексу задач для РМС, що обробляється, так і обрання методології її дослідження [3]. Тому наразі для визначення можливих сценаріїв генезису явищ та процесів у системі «об'єкт обробки-предмет обробки» поки що обирають спрощенні варіанти [1, 3, 4, 5]. Найуживаніший з них – метод «чорного ящика», який розглядає тільки параметри входу та параметри і характеристики виходу. Так, для кондукційної електрострумової обробки розплавів (КЕСО), яку застосовують у ливарному виробництві, це параметри живлення (ПДЖ) та показники якості виливка (ПЯВ). При цьому в лабораторних умовах варіюють набором ПДЖ та шукають найбільш сприятливий варіант для ПЯВ. Але такий підхід є вельми витратним.

Розвиток методів математичного моделювання дозволив останніми роками застосовувати процедури та алгоритми дослідження процесів та явищ у РМС при КЕСО, які перетворюють «вхід» у «вихід».

АНАЛІЗ НАБУТОГО ДОСВІДУ

Принцип методу КЕСО полягає у тому, що через розплав за допомогою електродів пропускають електричний струм будь-якого типу: постійний по амплітуді (CC), постійний по знаку (випрямлений) (DC),

змінний (AC), імпульсний (PC). Традиційно використовують одне джерело живлення та пару електродів [1, 4–6]. Хоча, у роботі [7] показана дуже приваблива до застосування у ливарному виробництві перспектива використання одночасно для КЕСО декількох струмів та різних електродних систем. При цьому таких варіантів сполучення може бути декілька десятків, тому цей метод запропоновано назвати поліваріантним. Також у роботі [7] представлено експериментальні дані, які довели інноваційну привабливість цієї новації, навіть для одного з варіантів способу навантаження РМС. З цього приводу актуальною постає проблема розширення наукових уявлень щодо поліваріантного методу КЕСО, у першу чергу за допомогою дослідження характеристик електромагнітного поля, яке при цьому генерується і яке забезпечує формування вторинних полів – акустичного, теплового та поля течії. Саме їх інтегральна (сукупна) дія потенційно спроможна змінювати термодинамічний стан РМС так, щоб при розливанні та кристалізації забезпечити на фінішній ланці покращення ПЯВ.

Мета роботи. Методами імітаційного моделювання для 2D формату у меридіальній та азимутальній постановці визначити особливості розподілу характеристик термосилового впливу на РМС при застосуванні суперпозиції DC та PC.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Оберемо для аналізу циліндричну металеву ємність з футерованою внутрішньою поверхнею заповнену алюмінієво-кремнієвим сплавом АК7 при температурі 740°C. Діаметр ємності 0,09 м, висота 0,08 м, густина РМС при цій температурі становить 2200 кг/см³. Об'єм РМС дорівнював $432 \cdot 10^{-6}$ м³, маса $\approx 0,95$ кг. Питома електропровідність становить величину $4,123 \cdot 10^6$ См/м.

Для розрахунків використовували системи рівнянь Максвелла, Нав'є-Стокса, Фур'є відповідно для

визначення електромагнітних характеристик, течій та теплових полів. Принципи спрощення постановки задач та алгоритми розрахунків наведено у роботі [8].

Для дослідження оберемо пару циліндричних тонких електродів з бічною поверхнею, що є ізолюваною. Електроди розташовані діаметрально протилежно відносно осі ємності. Позитивний електрод практично заглиблений до дна ємності, негативний – на глибину до 5 мм. Такі електроди дозволяють генерувати в розплаві найбільш сприятливу топологію електричного та магнітного полів [1, 8].

Принцип навантаження імпульсним струмом (РС) реалізовано за допомогою суми струмів AC+DC, за умов, якщо їх частоти кратні, а змінний струм формалізовано формулою $I_{AC}=I_0 \cdot \sin(2\pi \cdot t/T)$, пульсуючий випрямлений $I_{DC}=I_0 \cdot \sin^2(2\pi \cdot t/T)$. Тоді імпульсний струм формалізовано суперпозицією струмів AC+DC у випадку застосування пари електродів, $I_S=(I_0/2) \cdot \sin(2\pi \cdot t/T_u) + (I_0/2) \cdot \sin^2(2\pi \cdot t/T_u)$. Варіювання періодом T_u фактично дасть нам у першому наближенні реалізувати послідовність імпульсів струму зі скважністю 50 % за умов, якщо частота AC дорівнює 50 Гц, а DC – 100 Гц. Прийемо, що амплітудні значення струмів при моделюванні у всіх випадках будуть дорівнювати $I_0=20$ А, період $T=0,02$ с, період $T_u=0,001$ с, час моделювання $t=0,04$ с, інтервал розбиття $\Delta t=10$ мкс.

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Моделювання у постановці меридіональних струмів (In-Plane (meridional)) виконаємо із застосуванням геометричної моделі задачі, яку показано на рис. 1. Зрівняння результатів проведемо для точок T1, T2, T3.

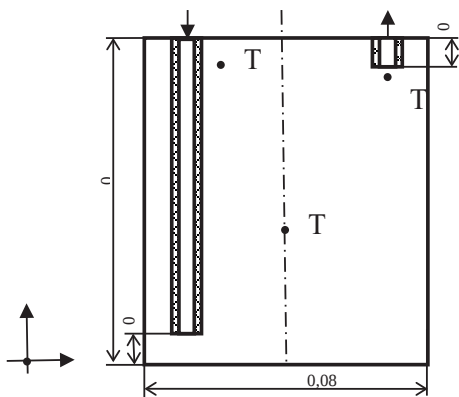
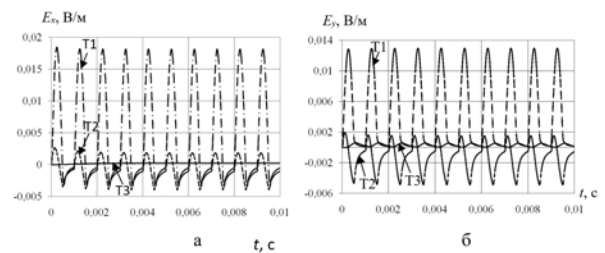


Рис. 1. Геометричні параметри задачі й точки візуалізації даних

На рис. 2, 3 представлені часові залежності напруженостей електричного поля, магнітного, теплового та швидкості течій при застосуванні РС для обробки.

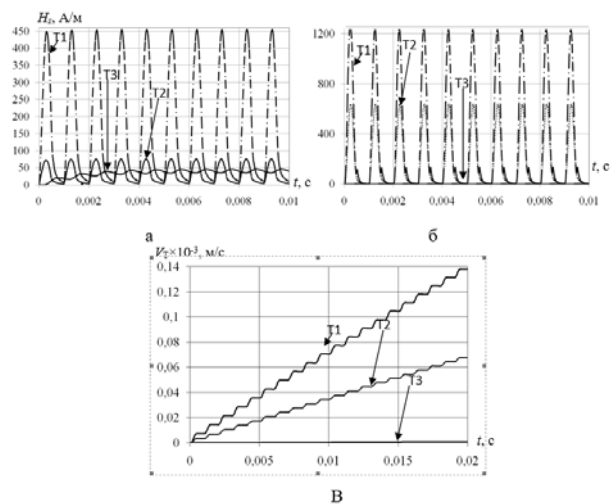
Як бачимо на рис. 2, 3, найбільш інтенсивний характер термосилового навантаження РМС при застосуванні РС спостерігається біля поверхні розплаву у точці T1. При цьому наведені характеристики

вказують на суттєво коливальний процес навантаження, а для залежності $V_T(t)$ з ознаками «струшування».



а) x-компонента напруженості електричного поля (E_x);
б) y-компонента напруженості електричного поля (E_y)

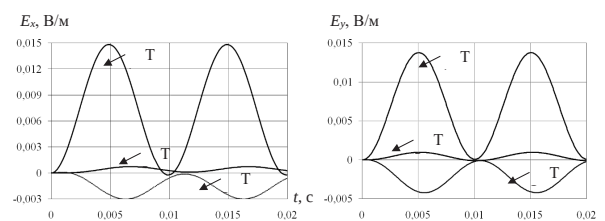
Рис. 2. Залежності амплітудних значень електричного поля від часу в точках візуалізації для імпульсного струму РС (1000 Гц)



а) амплітудно-часові залежності z-компоненти магнітного поля (H_z); б) амплітудно-часові залежності питомої теплової потужності (Q); в) амплітудно-часові залежності швидкостей течій (V_T)

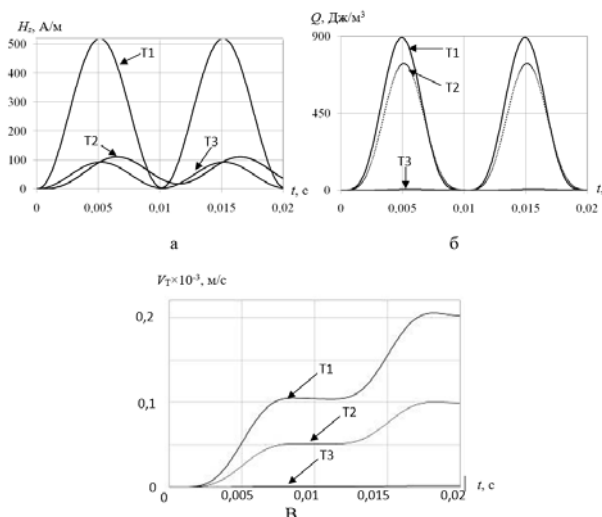
Рис. 3. Залежності амплітудних значень магнітного (H_z), теплового (Q) полів і швидкостей течій (V_T) від часу в точках візуалізації за умов протікання в розплаві струму РС (1000 Гц)

На рис. 4, 5 аналогічні залежності термосилового впливу представлені для застосування DC.



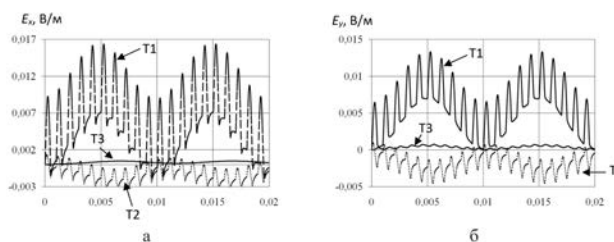
а) x-компонента напруженості електричного поля (E_x);
б) y-компонента напруженості електричного поля (E_y)

Рис. 4. Залежності амплітудних значень електричного поля від часу в точках візуалізації для DC (100 Гц)



а) амплітудно-часові залежності z -компоненти магнітного поля (H_z); б) амплітудно-часові залежності питомої теплової потужності (Q); в) амплітудно-часові залежності швидкостей течій (V_T);

Рис. 5. Залежність амплітудних значень магнітного (H_z), теплового (Q) полів і швидкостей течій (V_T) від часу в точках візуалізації за умов протікання в розплаві струму DC (100 Гц)

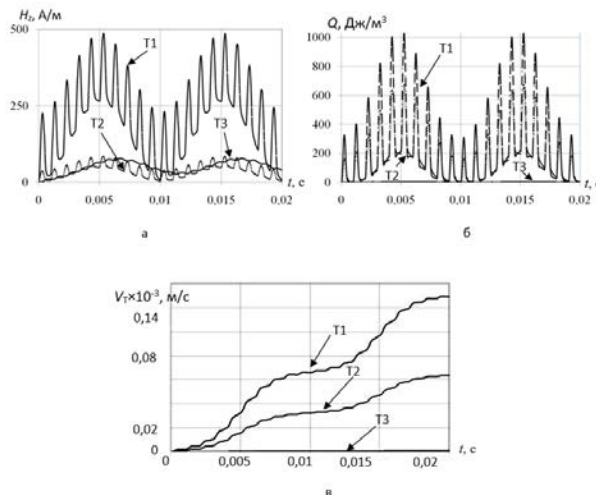


а) x -компонента напруженості електричного поля (E_x); б) y -компонента напруженості електричного поля (E_y)

Рис. 6. Залежності амплітудних значень електричного поля від часу в точках візуалізації для комбінації імпульсного та випрямленого струмів DC+PC (100 Гц+1000 Гц)

Наведені характеристики часових залежностей E , H , Q , V_T показують, що їх амплітудні значення для обраних типів струму практично однакові, що відповідає однаковому значенню I_0 для кожного типу струму. Але частотні характеристики струмів суттєво впливають на характер часових залежностей. При цьому DC+PC дозволяє реалізувати більш нелінійні характеристики, що може позитивно вплинути на термосилове навантаження [1]. Також зазначимо, зрівнюючи дані у точках T1, T2, T3, що топологія характеристик, які досліджуються, є неоднорідною.

При цьому найбільш інтенсивне навантаження буде реалізовуватись біля поверхні РМС. Тому надамо результати розрахунків вказаних характеристик в азимутальній постановці саме в цій площині (рис. 8).



а) амплітудно-часові залежності z -компоненти магнітного поля (H_z); б) амплітудно-часові залежності питомої теплової потужності (Q); в) амплітудно-часові залежності швидкостей течій (V_T)

Рис. 7. Залежність амплітудних значень магнітного (H_z), теплового (Q) полів і швидкостей течій (V_T) від часу в точках візуалізації за умов протікання в розплаві струму DC+PC (100 Гц+1000 Гц)

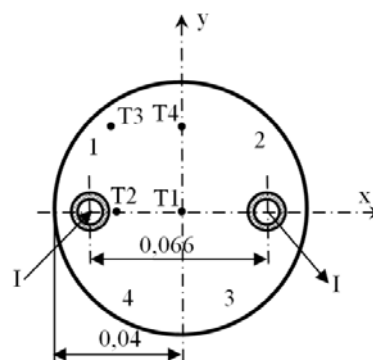
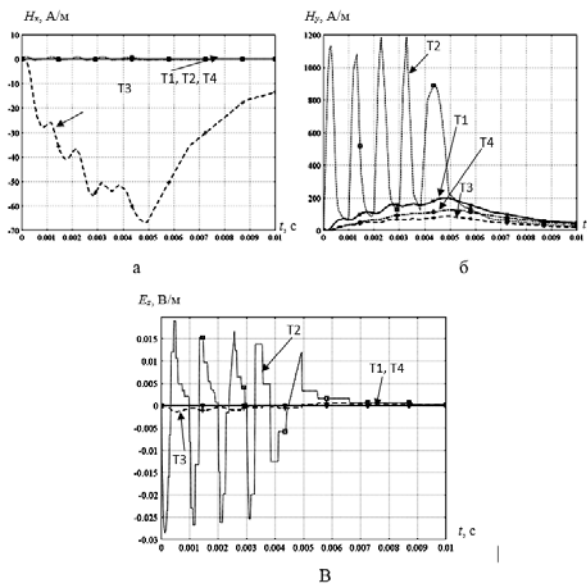
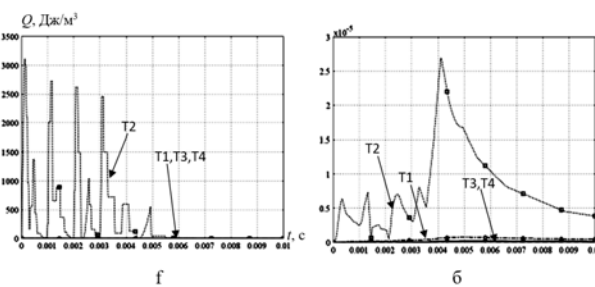


Рис. 8. Геометрична модель задачі в азимутальній постановці

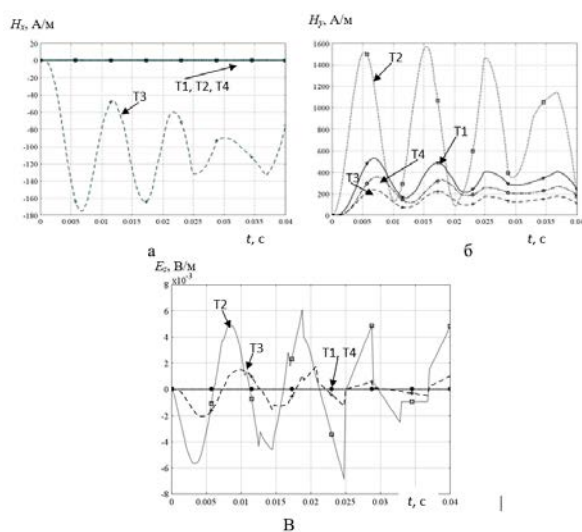
На рис. 9–13 представлено відповідні результати розрахунків. Вони свідчать про те, що характер часових залежностей термосилових характеристик є суттєво нелінійним та неоднорідним і також суттєво залежить від частоти струму.



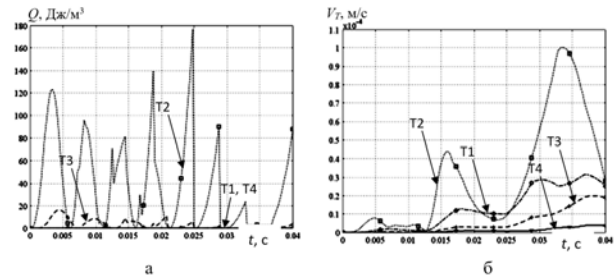
а) x -компонента магнітного поля; б) y -компонента магнітного поля; в) z -компонента електричного поля
Рис. 9. Часові залежності магнітного та електричного полів у точках візуалізації для РС (1000 Гц)



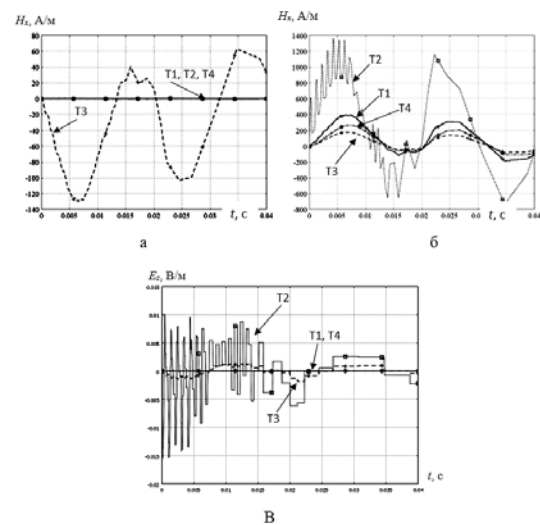
а) теплове поле (Q); б) швидкості течій у розплаві (V_T)
Рис. 10. Часові залежності теплового та гідродинамічного полів у розплаві в точках візуалізації для РС (1000 Гц)



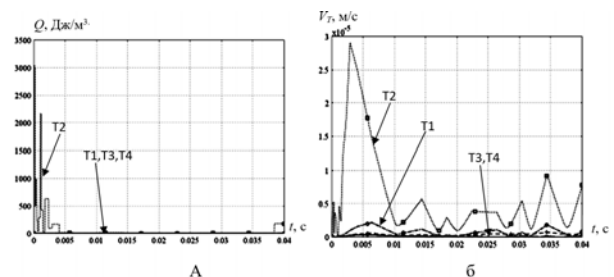
а) x -компонента магнітного поля; б) y -компонента магнітного поля; в) z -компонента електричного поля
Рис. 11. Часові залежності магнітного та електричного полів у точках візуалізації для DC (100 Гц)



а) теплове поле (Q); б) швидкості течій у розплаві (V_T)
Рис. 12. Часові залежності теплового та гідродинамічного полів у розплаві в точках візуалізації для DC (100 Гц)



а) x -компонента магнітного поля; б) y -компонента магнітного поля; в) z -компонента електричного поля
Рис. 13. Часові залежності магнітного та електричного полів у точках візуалізації для DC+PC (100 Гц+1000 Гц)



а) теплове поле (Q); б) швидкості течій у розплаві (V_T); T1–T4 – точки візуалізації
Рис. 14. Часові залежності теплового та гідродинамічного полів у розплаві в точках візуалізації для DC+PC (100 Гц+1000 Гц)

АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані дані показали суттєвий вплив частоти струмів на характер зміни у часі характеристик, що досліджувались. Суттєво нелінійний процес навантаження можливо отримати при застосуванні імпульсного струму. Цей факт підтверджено експериментальними даними роботи [7], де показано, що саме

при застосуванні DC+PC властивості виливка суттєво покращились. Так, тимчасовий опір (межа міцності) σ_B виріс на 13%, відносно видовження δ збільшено у 1,5 рази, а відносно звуження Ψ отримано на рівні 4,4%.

ВИСНОВКИ

1. В роботі методом скінчених елементів у зазначеній постановці визначено потенційну можливість різних типів струму (DC, PC, DC+PC) утворювати

у рідкометалевій системі суттєво різні розподіли таких важливих характеристик термосилового навантаження РМС як напруженість електричного та магнітного полів, теплове поле та поле течій.

2. Найактивніший термосиловий вплив притаманний саме суперпозиції імпульсного та випрямленого струмів, за допомогою якого у РМС реалізуються суттєво нелінійні коливальні процеси термосилового навантаження.

REFERENCES

- [1] Zaporozhets, Yu.M., Ivanov, A.V., Kondratenko, Yu.P. and Tsurkin, V.M. (2021). The features of controlled conductive electric current treatment of liquid metals. In: *Advances in Engineering Research*, Petrova V.M., Ed., 44, New York: Nova Science Publishers, 1-114.
- [2] Podoltsev, A.D., Kucheryavaya, I.N. (2015). *Multiphysics modeling in electrical engineering*. Kyiv: Institute of electrodynamics Ukrainian national academy of sciences. 304 p.
- [3] Starish, O.H. (2005). *Sistemolohiia [Sytemology]*. Kyiv. [in Ukrainian].
- [4] Li, Y., Jiang, H., Sun, H., Zhang, L., He, J., & Zhao, J. (2023). Microstructure Evolution of the Pb–Al Alloy Solidified Under the Effect of Electric Current Pulses. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 54, 2564-2574. <https://doi.org/10.1007/s11663-023-02857-7>
- [5] Zhang, Y.H., Xu, Y.Y., Ye, C.Y. *et al.* (2018). Relevance of electrical current distribution to the forced flow and grain refinement in solidified Al–Si hypoeutectic alloy. *Sci Rep* 8, 3242. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21709-y>
- [6] Prigunova, A. G., Koshelev, M. V., & Borisov, A. G. (2022). 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. *Materials Science and Technology*, 38(4), 246–253. <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2037059>
- [7] Tsurkin, V.M., Ivanov, A.V., Zaporozhets, Yu.M., Zhdanov, O.O., Chestnykh, M.V. (2024). Multivariant Method of Conductive Electric Current Treatment of Molten Metal. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 60(1), 31-41. <https://doi.org/10.3103/S1068375524010150>.
- [8] Ivanov, A.V., Tsurkin, V.N. (2019). Peculiarities of Distribution of Electromagnetic and Hydrodynamic Fields for Conductive Electric Current Treatment of Melts in Different Modes. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 55(1). 53-64. <https://doi.org/10.3103/S1068375519010101>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Zaporozhets, Yu. M., Ivanov, A.V., Kondratenko, Yu. P. and Tsurkin, V. M. (2021). The features of controlled conductive electric current treatment of liquid metals. In: *Advances in Engineering Research*, Petrova V.M., Ed., 44, New York: Nova Science Publishers, 1-114
- [2] Подольцев, О. Д., Кучерява, І. М. (2015). Мультифізичне моделювання в електротехніці. Київ: Інститут електродинаміки НАНУ. 304 с.
- [3] Старіш, О. Г. (2005). Системологія. Київ: Центр навчальної літератури. 232 с.
- [4] Li, Y., Jiang, H., Sun, H., Zhang, L., He, J., & Zhao, J. (2023). Microstructure Evolution of the Pb–Al Alloy Solidified Under the Effect of Electric Current Pulses. *Metallurgical and Materials Transactions B*. Vol. 54. P. 2564-2574. <https://doi.org/10.1007/s11663-023-02857-7>
- [5] Zhang, Y.H., Xu, Y.Y., Ye, C.Y. *et al.* (2018). Relevance of electrical current distribution to the forced flow and grain refinement in solidified Al–Si hypoeutectic alloy. *Sci Rep* 8, 3242. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21709-y>
- [6] Prigunova, A. G., Koshelev, M. V., & Borisov, A. G. (2022). 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. *Materials Science and Technology*. Vol.38. №4. P. 246–253. <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2037059>
- [7] Tsurkin, V.M., Ivanov, A.V., Zaporozhets, Yu.M., Zhdanov, O.O., Chestnykh, M.V. (2024). Multivariant Method of Conductive Electric Current Treatment of Molten Metal. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. Vol. 60. P. 31-41. <https://doi.org/10.3103/S1068375524010150>
- [8] Ivanov, A.V. (2019). Peculiarities of Distribution of Electromagnetic and Hydrodynamic Fields for Conductive Electric Current Treatment of Melts in Different Modes. *Surf. Eng. Appl. Electrochem*. Vol. 55, №1. P. 53-64. <https://doi.org/10.3103/S1068375519010101>

© Іванов А. В., Петриченко С. В., Садовий О. С.
Дата надходження статті до редакції: 03.11.2024
Дата затвердження статті до друку: 17.11.2024