

**Левченко Сергій Андрійович**, доцент, кандидат технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-2947-3963

**Коваленко Віктор Леонідович**, професор, доктор технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-5950-4412

**Артемчук Віктор Васильович**, професор, доктор технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-6056-5344

**Башлій Сергій Вікторович**, доцент, кандидат технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-6134-4849

**Єрофєєва Аліна Анатоліївна**, старший викладач, кандидат технічних наук, інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-2981-4118

## ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕМІШУВАННЯ МЕТАЛУ

Запропоновано методика виконання теоретичних досліджень за допомогою конформних відображень щодо визначення дії сил на розплав металу в електросталеплавильних печах з урахуванням цілеспрямованої дії магнітного поля. Проаналізовано вид магнітного поля з двофазним статором. На підставі запропонованої методики використання конформного відображення є можливим визначити тягове зусилля у кожній точці розплаву. Запропоновані функції конформних відображень, використання яких дозволяє перейти від нерівномірного магнітного поля до сукупності взаємоперпендикулярних прямих. Запропоновано функції переходу від нерівномірного магнітного поля до рівномірного. Вказано на складнощі за підбирання функцій перетворення та застосування інтегралу Кристоффеля-Шварца. Заміна інтегральних рівнянь для визначення загальної сили, яка створює рух розплаву металу, на алгебраїчні функції конформних відображень дає можливість розробити відповідні комп'ютерні програми для автоматичного регулювання потужності індукційно-дугових сталеплавильних печей, що є підґрунтям для проектування сучасних електрометалургійних комплексів з покращеними техніко-економічними показниками, які спроможні забезпечити конкурентоздатність вітчизняного металургійного виробництва.

Ключові слова: дугова сталеплавильна піч, конформні відображення, тягове зусилля, течія розплаву металу, інтеграл Кристоффеля-Шварца

*Вступ.* Низька ефективність роботи існуючих дугових сталеплавильних печей (ДСП) пояснюється недостатнім вивченням електрофізичних процесів, що відбуваються в них, та, як наслідок, недосконалим конструктивним виконанням електросталеплавильного обладнання та нераціональним, з точки зору економії електроенергії, технологічним процесом. Тому є дуже актуальним, особливо через постійне подорожчання електроенергії, виконання подальших науково-експериментальних досліджень електрофізичних процесів у таких печах, створення за їх результатами високо-ефективного електросталеплавильного обладнання та удосконалення технологічних процесів. Підвищення ефективності роботи ДСП й одержання високоякісних металів та їхніх сплавів можливо досягти за рахунок застосування цілеспрямованого впливу електромагнітного поля, який прискорює рух розплаву металу та призводить до інтенсифікації процесу плавлення та дає змогу забезпечити необхідну мікроструктуру готової продукції [1].

Під час ретельного та досконалого вивчення питання щодо пошуку можливостей з метою інтенсифікації плавлення а скорочення енергетичних витрат у ДСП потрібно

мати на увазі, що тривалість усього металургійного процесу виплавляння сталі  $\tau_{пл}$  складається з трьох основних періодів:

$$\tau_{пл} = \tau_n + \tau_{розп} + \tau_{мо}, \quad (1)$$

де  $\tau_n$  – період нагрівання;  $\tau_{розп}$  – період розплавлення металу та доведення до кипіння;  $\tau_{мо}$  – період металургійної обробки металу.

Перші два періоди пов'язані з потужністю, що споживається піччю. На перший погляд, вирішити цю проблему можливо було би шляхом збільшення електричної потужності, що вводиться до печі. Але таке просте вирішення має низку недоліків:

- обмежену теплопередачу від дуги рівномірно до всього об'єму металу, що призводить до різкого зростання температури на поверхні розплаву біля електродів та, як наслідок, підвищений вигар металу, збільшення викидів пічних газів, що, в свою чергу, призводить до надмірних витрат електроенергії;

- суттєве перевантаження пічного трансформатора та «короткої мережі», що призводить до перевитрат електроенергії та може спричинити аварійні ситуації;

- понаднормове збільшення температури верхньої частини футерівки печі, що спричинює його інтенсивний знос і скорочує термін експлуатації.

Тривалість  $\tau_{мо}$  залежить, в основному, від інтенсивності металургійних процесів, які можливо прискорити шляхом збільшення швидкості перемішування.

Це можливо здійснити завдяки використанню ДСП з різними індукційними пристроями [2]. У таких печах із збільшенням їхньої місткості та потужності зростає сила струму та збільшується потреба у перемішуванні розплаву металу за рахунок електромагнітних сил. Проте, в існуючих дугових печах цих сил не завжди достатньо для необхідного збільшення швидкості перемішування, тим більше, що із збільшенням місткості печі, частина ванни, яка охоплюється цим перемішуванням, зменшується: так у печі місткістю 0,5 т струмами дуг перемішується приблизно 30% об'єму металу, а у печі місткістю 30 т – приблизно 3,5% [3].

Таким чином, щоб найуспішніше розв'язати завдання підвищення ефективності роботи печей, потрібно дослідити структуру течії розплаву металу та результативність цілеспрямованого впливу магнітного поля на нього.

*Аналіз досліджень і постановка проблеми.* Питаннями електромагнітного перемішування металу займалися професори С.І. Тельний, В.П. Шамота та М.В. О कोरोков. Аналогічні найвдаліші експериментальні дослідження також виконували у Шведській електротехнічній компанії (ASEA) та інших металургійних підприємствах, у тому числі в Україні на ВАТ «Дніпрспецсталь», інституті електродинаміки НАНУ [5; 8].

Зараз цими питаннями займаються відомі світові металургійні компанії «World Steel Association», «Arcelor Mittal» (Польща), «Nippon Steel» (Японія), «JFE» (Японія), «PORCO» (Італія), «Baosteel» (КНР), «U.S. Steel» (США) та багато інших.

Аналіз результатів цих робіт показав, що безпосереднє дослідження процесів електро- та гідродинаміки перемішування металу у ванні дугової печі дуже складне через те, що розплав металу є непрозорим і має високу температуру, тому для їх вивчення потрібно припустити наступне:

- теоретичний розрахунок зусиль і швидкостей по об'єму ванни можливо виконати тільки зі значними припущеннями;

- до перемішувальних пристроїв не завжди можливо використати залежності, які є справедливими для інших електромагнітних пристроїв;

- окрім швидкості руху металу, виключно важливе значення має якість руху, під якою розуміється відповідність руху вимогам металургійного процесу (відсутність пульсацій на поверхні, рівномірність руху за всією товщиною розплаву металу, а також

вибір оптимальної частоти струму, від якої залежить глибина проникнення, що для кожного окремого періоду роботи печі виконується особливо;

– пристрій для електромагнітного перемішування металу слід розглядати як допоміжний додатковий пристрій у конструкції печі, призначений для покращення технологічного й енергетичного режиму плавлення.

Головними вимогами до конструкції пристрою для перемішування металу є раціональні геометричні й електричні параметри, які забезпечують оптимальні для технологічного процесу та якості металу швидкість і якість руху останнього.

Неможливість виконання високоточного теоретичного розрахунку, з одного боку, та необхідність у короткий термін створити економічні дослідно-промислові зразки ДСП, з іншого, визначили переважно емпіричний метод вивчення цього питання. Не зважаючи на те, що існує багато методів виконання аналогічних досліджень, всі вони не дають суттєвих позитивних результатів, які б цілком задовольнили вимогам реального металургійного виробництва. Тому запропоновано застосування методу конформних відображень.

*Головна частина досліджень.* Здійснюємо застосування конформних відображень магнітного поля в електросталеплавильній печі дозволить за спрощеною методикою визначити тягове зусилля у кожній точці розплаву.

Відомо, що на висоті  $h$  зусилля  $P_h$  на  $1 \text{ см}^2$  пропорційне квадрату щільності індукційованих струмів. Можна, також, записати [2]:

$$P_h = k \cdot B_h \cdot j_h = k' \cdot B_h^2, \quad (2)$$

де  $B_h$  – магнітна індукція на висоті  $h$  від дна ванни;  $j_h$  – щільність струму;  $k, k'$  – коефіцієнти пропорційності.

Магнітне поле над індуктором є доволі нерівномірним, магнітна індукція безперервно та суттєво змінюється у межах об'єму поля за величиною та напрямком, що підтверджує рис. 1 [2].

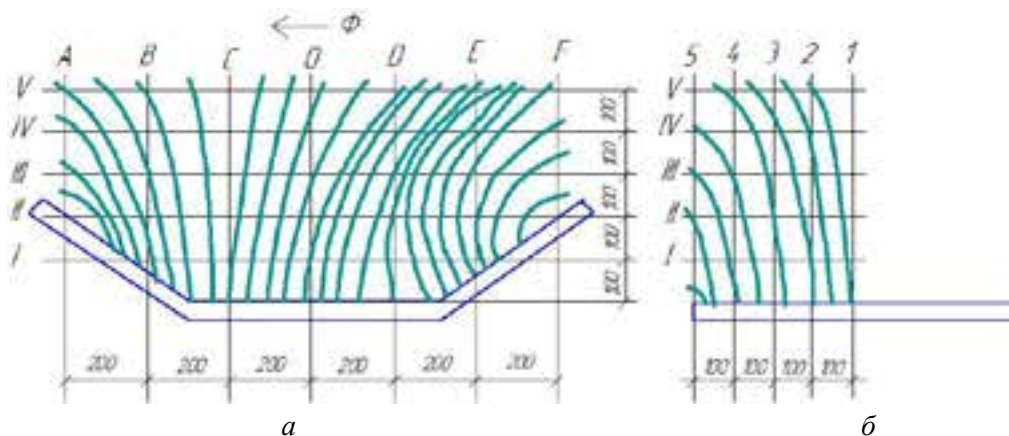


Рисунок 1. Магнітне поле над двофазним статором:  
а – у поздовжній площині; б – у поперечній площині

Через те, що ванна є усіченим конусом з меншою нижньою основою, то глибина нижнього шару  $h_n$  більше глибини  $h_e$  верхнього шару. Через це поділ магнітних та електромагнітних сил в об'ємі розплаву є нерівномірним: у нижній частині значно більший, ніж на поверхні. Результуюча сила на вертикальний стовп металу з основою в  $1 \text{ см}^2$  дорівнює різниці двох сил [2]:

$$P_{рез} = \int_0^{h_n} P_h dh - \int_{h_n}^{h_n+h_e} P_h dh. \quad (3)$$

Внаслідок неоднорідності поля в усіх напрямках і неоднорідності повітряного зазору між дном ванни і статором за всю площу дна загальна сила, яка створює рух металу, виражається виключно складною формулою:

$$P_{заг} = \iiint_{V_u} P_h dh dy dx - \iiint_{V_e} P_h dh dy dx. \quad (4)$$

Необхідно врахувати, що зі змінюванням  $h$  змінюються й межі інтегрування за вісями  $x$  і  $y$ .

Для практичного визначення сили  $P_{заг}$ , яка діє у кожній точці розплаву, запропоновано застосування конформних відображень, які відображають одну нерівномірну задану область (рис. 1) на іншу (сукупність взаємоперпендикулярних прямих) (рис. 2). Знаходження сили, яка діє на метал, у рівномірному полі не спричинює складнощів.

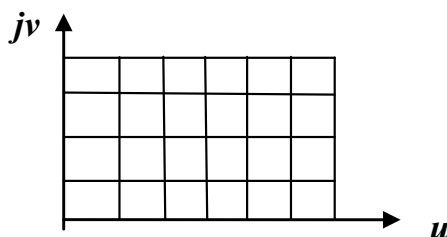


Рисунок. 2. Сукупність взаємоперпендикулярних прямих

Якщо кожному комплексному числу  $z = x + j \cdot y$  з множини  $g$  (реальна довільна область) поставлено у відповідність одне або декілька (у випадку багатозначної функції) комплексних чисел  $w = u + j \cdot v$  з множини  $G$  (область, на яку здійснюють конформне відображення), то вважають, що  $w$  є функцією комплексного змінного  $z$ , яка визначається з множини  $g$

$$w = f(z). \quad (5)$$

Маючи деяку аналітичну функцію  $w = f(z)$ , можна довільну область  $g$ , в якій ця функція є однолистою [6] (або взаємно однозначною [7]), відобразити конформно на деяку область  $G$ .

Для практики значний інтерес має питання, як за заданими областями  $g$  і  $G$  знайти функцію, яка здійснює конформне відображення однієї з цих областей на іншу.

Під час розв'язання головної задачі конформних відображень – задачі пошуку функції, яка здійснює конформне відображення заданої області, доводиться застосовувати різні спеціальні методи. Одним з методів є підбирання потрібних комбінацій елементарних функцій за умови, що вдасться знайти області, які відображаються цими функціями. Такий підхід передбачає вільне володіння геометричними властивостями елементарних функцій комплексного змінного.

З функцій, що мають практичне застосування для вирішення даної задачі, представляє інтерес функція

$$w = m \cdot \operatorname{arch} \left( \frac{z}{k} \right), \quad (6)$$

яка здійснює конформне перетворення сукупності взаємоперпендикулярних еліпсів та гіпербол на площині  $z$  в сукупність взаємоперпендикулярних прямих (рис. 2), де  $m$  та  $k$  – деякі числові коефіцієнти, які знаходять з граничних умов. Також можуть застосовуватися дробово-лінійні, ступеневі, показникові, логарифмічні, тригонометричні функції та їх суперпозиції [4].

Слід зауважити, що конформні відображення слід виконувати для поздовжньої та поперечної площин, а загальну силу, яка діє у кожній точці, знаходити шляхом векторного додавання.

Якщо статор представити у вигляді ламаної лінії, то поле на площині  $z$  з кінцевим числом зламів може бути конформно відображеним на верхню напівплощину  $w$  за допомогою інтеграла Кристоффеля-Шварца [4]:

$$w = C \cdot \int_0^z \prod_{k1}^n (z - \lambda_k)^{\alpha_k - 1} dz + C_1. \quad (7)$$

Зворотній перехід має вигляд

$$z = A \cdot \int_0^w \prod_{k1}^n (w - u_k)^{\alpha_k - 1} \cdot \exp(j\gamma\pi) dw + C_1, \quad (8)$$

де  $\lambda_k$  – точки на вісі  $x$ ;  $u_k$  – точки на вісі  $u$ ;  $\alpha_k$  – кути ламаної лінії;  $A$ ,  $C$  – комплексні постійні;  $C_1$  – комплексна постійна інтегрування.

*Висновки.*

1. Для визначення тягового зусилля  $P_h$  у кожній точці розплавленого металу запропоновано використовувати конформне відображення заданої області нерівномірної магнітної індукції у рівномірну  $w = f(z)$ , що дає змогу обчислювати рівномірне силове поле  $P_0$  у кожній точці розплаву.

2. Для розрахунків значень реального тягового зусилля  $P_h$  у кожному елементарному перерізі розплавленого металу потрібно значення тягового зусилля у рівномірному полі  $P_0$  перерахувати через зворотню аналітичну функцію перетворення координат  $z = F(w)$ . Точність визначення реальної сили  $P_h$  залежить від того, наскільки точно підібрана функція конформного відображення  $w = f(z)$  або їх суперпозиція.

3. Заміна інтегральних рівнянь для визначення загальної сили, яка створює рух розплаву металу, на алгебраїчні функції конформних відображень дає змогу розробити відповідні комп'ютерні програми для автоматичного регулювання потужності індукційно-дугових сталеплавильних печей, що є підґрунтям для проектування сучасних електрометалургійних комплексів з покращеними техніко-економічними показниками, які спроможні забезпечити конкурентоздатність вітчизняного металургійного виробництва.

### Бібліографічний перелік

1. Пачколін Ю.Е. Розробка та дослідження електросталеплавильного комплексу з індукційно-дуговим перетворенням електроенергії : дис. канд. техн. наук. Запоріжжя, 2007. 172 с.
2. Огороков Н.В. Электромагнитное перемешивание металла в дуговых сталеплавильных печах. Москва : Государственное научно-техническое издательство по черной и цветной металлургии, 1961. 176 с.
3. Огороков Н.В., Мальцев Л.А. Теплообмен в ванне дуговой электропечи при стационарном тепловом потоке. *Сборник трудов Московского института стали XXXVIII*. Москва : Металлургия, 1958. 159 с.
4. Лаврик В.И., Савенков В.Н. Справочник по конформным отображениям. Киев : Наукова думка, 1970. 252 с.
5. Антонов М.Л., Бондаренко О.О., Пачколін Ю.Е. Патент на корисну модель «Спосіб плавлення металу на сталеплавильних комплексах» № 23419. Зареєстровано в державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25.052007 р. МПК (2006).
6. Сборник задач по математике для ВТУЗов. Специальные разделы математического анализа. *Главная редакция физико-математической литературы*. Москва : Наука, 1981. 368 с.
7. Голубев В.В. Однозначные аналитические функции. Автоморфные функции. Москва : Физ.-мат. гиз, 1961.
8. Токаревський А.В., Глухенький О.І., Максименко В.Ю., Гориславец Ю.М. Патент на корисну модель «Спосіб електромагнітного перемішування рідкого металу» UA 89970 U. Зареєстровано в державній службі інтелектуальної власності України 12.05.2014 р.

9. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 2. С. 3–15.
10. Тир Л.Л., Столов М.Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах. Москва : Металлургия, 1991. 280 с.
11. Dubodelov V.I., Gorislavets Yu.M., Glukhenkyi A.I., Fikssen V.M. Electromagnetic stirrer of liquid metal with alternate action of traveling and pulsating magnetic fields. *Proceedings of the 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015*. October 12–16, 2015. Cannes, France. Pp. 605–608.
12. Non ferrous casting. Equipment MHD Technology. Riga : Krrsainie lējumi, 2004.

### References

1. Pachkolin Y.E. Research and Development of electric steel-melting complex with induction arc energy transformation [Rozrobka ta doslidzhennya electrostaleplavilnogo kompleksu z induktsiyno-dugovym peretvorennyam electroenergii] : Dis. PhD in Technical Sciences. Zaporizhia, 2007. 172 p.
2. Okorokov N.V. Electromagnetic metal stirring in electric arc steel furnaces [Electromagnitnoe peremeshivanie metalla v dugovykh staleplavilnykh pechakh]. Moskva : State scientific and technical publishing house in ferrous and nonferrous metallurgy, 1961. 176 p.
3. Okorokov N.V., Maltsev L.A. Heat-exchange in the electric arc furnace bath at continuous heat flux. *Collection of studies of the Moscow Steel Institute of XXXVIII* [Teploobmen v vanne dugovoy elektropechi pri stacionarnom teplovom potoke. Sbornik trudov Moskovskogo instituta stali XXXVIII]. Moskva : Metallurgiya, 1958. 159 p.
4. Lavrik, V.I., Savenkov V.N. Reference book of conformal maps [Spravochnik po konformnym otobrazheniyam]. Kiev : Naukova Dumka, 1970. 252 p.
5. Antonov M.L., Bondarenko O.O., Packolin Y.E. Patent for utility model «Method of melting metal in the steel complexes» [Patent na korysnu model “Sposib plavlennya metalu na staleplavilnykh kompleksakh”]. No. 23419. Registered in the state register of patents of Ukraine for utility models may 25, 2007, IPC (2006).
6. Collection of problems in mathematics for colleges. Special topics in mathematical analysis [Sbornik zadach po matematike dla VTUzov. Spetsialnye razdely matematicheskogo analiza]. *The main edition of physico-mathematical literature*. Moskva : Nauka, 1981. 368 p.
7. Golubev V.V. Unambiguous analytical functions. Automorphic functions [Odnznachnye analiticheskie funktsii. Avtomorfnye funktsii]. Moskva : Phys.-Mat. Guise, 1961.
8. Tokarevskiy A., Gluhenskiy O., Maksymenko V., Goryslavez Y. Patent for utility model [Patent na korysnu model «Sposib elektromagnitnogo peremishuvannia ridkogo metalu»]. UA 89970 U. Registered in the state register of Ukraine 12.05.2014 p.
9. Podoltsev A.D., Kucheriava I.N. Multiphysics modeling of electrotechnical devices. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No. 2. Pp. 3–15.
10. Tir L.L., Stolov M.Ya. Electromagnetic devices to control the circulation of the melt in electric furnaces. Moskva: Metallurgiya, 1991. 280 p.
11. Dubodelov V.I., Gorislavets Yu.M., Glukhenkyi A.I., Fikssen V.M. Electromagnetic stirrer of liquid metal with alternate action of traveling and pulsating magnetic fields. *Proceedings of the 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015*. October 12–16, 2015. Cannes, France. Pp. 605–608.
12. Non ferrous casting. Equipment MHD Technology. Riga: Krrsainie lējumi, 2004.

**Levchenko Serhii**, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University

**Kovalenko Victor**, Chief of Department, Professor, Doctor of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University

**Artemchuk Victor**, Professor, Doctor of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University

**Bashliy Serhii**, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University

**Yerofieieva Alina**, Senior Lecturer, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University

### **ELECTRODYNAMIC FEATURES OF METAL MIXING**

The method of theoretical research is proposed with the help of conformal reflections on determination of forces on metal melting in electro-steel furnaces taking into account the purposeful action of the magnetic field. The type of magnetic field with two-phase stator is analyzed. Based on the proposed method of using conformal display, it is possible to determine the traction force at each melt point. Proposed functions of conformal reflections, the use of which allows you to switch from non-dimensional magnetic field to a set of mutually perpendicular lines. The functions of transition from uneven magnetic field to uniform field are proposed. It is noted that the difficulty in the selection of conversion functions and the application of the Kristoffel-Schwartz integral. Replacement of integral equations to determine the overall force that creates the movement of metal melt, to algebraic functions of conformal reflections makes it possible to develop appropriate computer programs for automatic regulation of power of induction-arc steel furnaces, which are the basis for the design of modern electrometallurgical complexes with improved technical and economic indicators that are able to ensure the competitiveness of domestic metallurgical production.

Keywords: arc steel melting furnace, conformal reflection. traction force, metal melt current, Kristoffel-Schwartz integral

Стаття надійшла: 29.10.2021 р.