

5. Контроль температури: Дуже висока температура розплаву може сприяти утворенню більшої кількості газових бульбашок. Контроль температури розплаву та форми допоможе мінімізувати цей дефект.

6. Використання додаткових обробок: Після виливки можна провести додаткові обробки, такі як термічна обробка, вакуумування або дегазація, щоб видалити гази з внутрішніх структур виливки.

Таким чином усунення пористості може вимагати комплексного підходу, включаючи зміни у процесі заливання, підготовки розплаву та форми, а також контролю параметрів навколишнього середовища.

УДК 621.74

**В. П. Школярєнко**

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*E-mail:* [hvp@ukr.net](mailto:hvp@ukr.net)

### **МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ РОЗПЛАВУ У ЛИВАРНИХ ІНДУКЦІЙНИХ ПЕЧАХ**

Відомо, що індукційні печі широко застосовується у ливарному виробництві. При експлуатації індукційних печей мають місце значні перевитрати електроенергії через конструктивну недосконалість і невідповідність існуючого технологічного (металургійного) процесу сучасним європейським вимогам до енергозбереження. Тому, актуальним є дослідження способів підвищення енергоефективності плавки та електромагнітного перемішування розплавів у індукційних печах [1].

Промисловість випускає такі індукційні печі: високочастотні (100-200 кГц), середньої частоти (500-1000 Гц), промислової частоти (50 Гц) [2]. Для перетворення частоти застосовуються обертові та тиристорні перетворювачі частоти. Останні забезпечують суттєву економію витрат внаслідок компактності розташування плавильного агрегату, а також зниження шуму при роботі у цеху. Крім того, при використанні тиристорних перетворювачів частоти струм індуктора та частота регулюються автоматично залежно від стану металу у печі та ступеня заповнення її шихтою. Печі середньої частоти дозволяють збільшувати потужність, що підводиться, порівняно з печами промислової частоти, що призводить до зниження часу розплавлення шихти [2]. Здебільшого

промислові індукційні тигельні печі забезпечують гарне перемішування розплаву. Не великі печі, які працюють на підвищених частотах, майже не забезпечують електромагнітне перемішування розплаву у ході плавки. Таким чином, використання у індукційних печах різних частот мають свої переваги та недоліки.

Удосконалити індукційні тигельні печі можна шляхом збільшення питомої потужності на індукторі при переході на більш високі частоти струму у індукторі печі. Однак силовий вплив високочастотного електромагнітного поля на розплав металу при цьому зменшиться, а інтенсивність магнітогідродинамічних процесів перемішування металу знизиться. Для отримання гомогенного сплаву з високою точністю розподілу температури у ванні розплаву електроживлення печей проводиться струмами високої та низької частоти на різних стадіях плавки.

В удосконалених (модернізованих) індукційних печах може бути реалізовано декілька режимів електроживлення на різних частотах індуктора печі [3-10]. Основний режим розігріву та плавки шихти здійснюється при електроживленні печі струмами середньої частоти, що відповідає резонансній частоті навантажувального контуру. Перехід до режиму активного перемішування струмами низької частоти здійснюється зменшенням резонансної частоти контуру навантаження, наприклад, перемиканням послідовно з'єднаних блоків компенсуючих конденсаторів на паралельну схему їх підключення до індуктора. При роботі на середній частоті у індукторі формується подвійна вихідна напруга джерела живлення, що дозволяє знизити рівень струму індуктора та зменшити активні втрати в контурі навантаження, пропорційні квадрату струму. Для активізації електрогідродинамічних процесів у розплаві здійснюється перемикання режиму електроживлення індуктора на низькій частоті. Резонансна частота контуру навантаження знижується вдвічі і напруга на індукторі також зменшується у два рази, збільшуючи швидкість перемішування розплаву. Зміна частоти струму індуктора збільшує силовий вплив на розплав металу і збільшує швидкість перемішування рідкого металу, але не змінює процес циркуляції металу.

Таким чином, одночасне електроживлення індукційної тигельної печі струмами високої і низької частоти дозволяє підвищити ефективність індукційної плавки металів на середніх частотах і розширити технологічні можливості печі шляхом управління рухом металу під дією струмів низької частоти. На стадії розігріву та плавки шихти потрібно максимальний рівень високочастотного струму, при якому здійснюється найбільш інтенсивне тепловиділення у металі. Після розплавлення та утворення рідкої ванни металу на стадії виконання технологічних операцій легування, гомогенізації та

вирівнювання температури розплаву доцільно здійснювати інтенсивний рух та перемішування металу під силовим впливом низькочастотної складової струму в індукторі, величина якої має бути максимальною.

Висновки:

1. Виявлено, що при експлуатації існуючих індукційних печей мають місце значні перевитрати електроенергії через конструктивну недосконалість і невідповідність існуючого технологічного (металургійного) процесу сучасним європейським вимогам до енергозбереження тому, дослідження способів підвищення енергоефективності плавки та електромагнітного перемішування розплавів у індукційних печах є актуальним науково-технічним завданням.

2. Запропоновано метод підвищення електромагнітного перемішування розплаву у ливарних індукційних печах шляхом зміни їх роботи у двох дискретних режимах високої і низької частоти.

3. Обґрунтовано, що удосконалення індукційних печей шляхом регулювання частоти індукційної плавки металів дозволить реалізувати гнучке управління нагріванням та рухом металу у ванні печі шляхом організації необхідного теплового та силового впливу електромагнітного поля. При цьому стає можливим створення нових технологій отримання високоякісних металів та сплавів завдяки підвищенню електромагнітного перемішування розплаву у ливарних індукційних печах.

### Список літератури

1. Pachkolin Yu., Bondarenko A., Levchenko S. Practical application of mathematical models of electro-thermo-mechanical processes in industrial induction furnaces with the aim of increasing their energy efficiency // Technology Audit and Production Reserves, 2018, №5/1(43). P.28-33. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.146484>

2. Довнар Г. В. Расчет шихты для плавки стали : учебн. пособ. / Г. В. Довнар, Б. М. Неменёнок, Г. А. Румянцева. Минск : БНТУ, 2022. 44 с. [https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/110931/Raschet\\_shihty.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/110931/Raschet_shihty.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

3. Спосіб регулювання потужності індукційної печі : пат. 25596 Україна : МПК H05B 6/06. № u200704333; заявл. 10.08.2007 ; опубл. 10.08.2007, Бюл. №12, 2007 р.

4. Спосіб індукційної виплавки металу : пат. 86718 Україна : МПК C22B 9/16, B22D 1/00. № a200802568; заявл. 28.02.2008 ; опубл. 12.05.2009, Бюл. № 9, 2009 р.

5. Лузгин В. И., Петров А. Ю., Шипицын В. В., Якушев К. В. Многоинверторные

среднечастотные преобразователи в системах электропитания индукционных установок // Электротехника, 2002, № 9. С.9-18.

6. Rudnev V. Induction Heating and Heat Treating for Aerospace Applications. Adv Mater Process. 2018 Feb-Mar;176(2). P.58-61.

7. Branover H. et al. Novel potentialities of electromagnetic stirring of melts in metallurgy //Proceedings of the joint. – 2005. – С. 31-34.

8. Eckert S, Nikrityuk P., Rabiger D., et al. Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part I. Flow field in a liquid metal column. Metallurgical and Materials Transactions: Process Metallurgy and Materials Processing Science, B; New York T38B, №6, (Dec 2007). P.977-988.

9. Ma X., Yang Y., Wang B. Effect of pulsed magnetic field on superalloy melt // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2009. – Т. 52. – №. 23-24. – С. 5285-5292.

10. Wang X. et al. A periodically reversed flow driven by a modulated traveling magnetic field: Part I. Experiments with GaInSn // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2009. – Т. 40. – №. 1. – P. 82.

УДК 621.74

**В. П. Школяренко, А. С. Нурадинов, С. В. Пригунов, І. А. Нурадинов**

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*E-mail:* [hvp@ukr.net](mailto:hvp@ukr.net)

### **МЕТОД УНИКНЕННЯ ГАРЯЧЕЛАМКОСТІ ТРУБНИХ ЗАГОТОВОК ЗІ СПЛАВУ АМг6 ПРИ ЛИТТІ У КОКІЛЬ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛИТТЯ ТА ЗАСТОСУВАННЮ ВІБРАЦІЇ**

Відомо, що алюмінієві сплави чутливі до гарячого розтріскування, наприклад, сплави Al-Cu або Al-Mg-Si [1]. У світі розроблено багато методів оцінки чутливості до утворення гарячих розривів [2-11], але дослідження проблеми гарячеламкості при литті у кокіль трубних заготовок зі сплаву АМг6 не проводилось, що обумовлює актуальність таких досліджень.

Згідно ДСТУ 9051:2020 [2] гарячі тріщини є одним з дефектів у розділі несучильностей у тілі вилівка. Схильність до утворення гарячих тріщин називається гарячеламкістю, яка залежить не тільки від піддатливої чи не піддатливої форми, температур