

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРОМИСЛОВИХ ІНДУКЦІЙНИХ ПЕЧАХ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Пачколін Ю. Е., Бондаренко О. О., Левченко С. А.

1. Вступ

На багатьох машинобудівних і моторобудівних підприємствах використовується плавлення в індукційних печах різних металів та їхніх сплавів з метою отримання заготовок, форма яких максимально наближена до геометричних розмірів готової деталі. Це, в свою чергу, дає можливість скоротити витрати на подальшу механічну обробку та підвищити конкурентоспроможність усього виробництва в цілому [1].

Індукційне нагрівання з подальшим розплавленням – найдосконаліший безконтактний спосіб передачі електромагнітної енергії до тіла, що нагрівається, за рахунок збудження в ньому електричних струмів (струмів Фуко) під дією змінного електромагнітного поля, створеного за допомогою індуктора. Також до позитивних характеристики індукційних печей слід віднести ефект постійного перемішування розплаву під дією електромагнітного поля, який дає можливість отримати високу однорідність структури сплаву, що вкрай необхідно в сучасному машинобудуванні.

Але на сьогодні при експлуатації індукційних печей [2] 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 індукційних сталеплавильних печей.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є промислова індукційна сталеплавильна піч.

Первинною обмоткою слугує індуктор, який обтікається змінним струмом. Вторинною обмоткою і одночасно навантаженням – сам метал, який завантажений в тигель та розміщений всередині індуктора. Через індуктор протікає змінний струм і створює електромагнітне поле. Електромагнітне поле пронизує провідний метал всередині індуктора та наводить згідно закону індукції вихрові струми. Це призводить до нагріву металу. Якщо подається достатня кількість електроенергії, то починається процес плавки металу. Утворення електромагнітних полів призводить до появи електромагнітних сил. Ці електромагнітні сили викликають в індукційній печі ефект руху розплаву та утворення сводоподібного купола розплавленого металу.

На рис. 1 показано, як діє електромагнітне поле всередині індуктора на розплав.

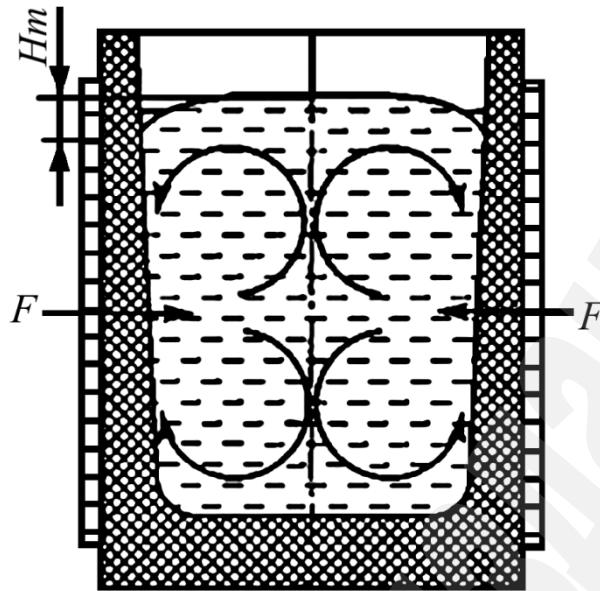


Рис. 1. Дія електромагнітного поля всередині індуктора на розплав:
 F – зусилля; H_m – висота меніску

Одним з найбільш проблемних місць індукційних сталеплавильних печей є низька енергоефективність через їх конструктивну недосконалість та існуючий технологічний процес теплової роботи, що призводить до перевитрат електричної енергії.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – виявити умови теплової роботи індукційної сталеплавильної печі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Розробити алгоритм режимів роботи сталеплавильного комплексу на базі індукційного перетворення електричної енергії.
2. Виявити розподілення електромагнітного поля всередині індуктора.
3. Виготовити спеціальний термопоплавок для дослідження руху розплаву металу.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Основними об'єктами досліджень електротермомеханічних процесів, що мають місце в індукційних печах при їх роботі є індуктор і метал (сплав), який підлягає розплавленню. Різноманітні фізичні явища, які відбуваються в порожнині індукційної печі, достатньо викладені в рамках механіки суцільних середовищ інтегральними та польовими характеристиками електромагнітного, теплового і напружено-деформованого стану, а також параметрами фазових перетворень у [3, 4].

Відомо, що найефективнішим методом розробки та проектування індукційних печей, а також технології плавлення є математичне моделювання. Існує велика кількість відповідних математичних моделей [5, 6]. Проте в своїй більшості вони мають переважно теоретичну направленість, а запропоновані аналітичні рішення та методики достатньо складні. Це суттєво обмежує їх застосування. Тому на практиці застосовують спрощені варіанти. Але вони не дають достатньої інформації для створення сучасних комп'ютерних програм, що забезпечило б необхідне підвищення ефективності технологічного (електрометалургійного) процесу.

У 1992 р. фірма АВВ (Швеція) створила двопостовий плавильний комплекс, який працює від одного двоенергоканального джерела живлення. Воно перерозподіляє потік енергії між печами в циклі плавки (плавильна система «Twin-Power») [7]. Фірма Inductortherm (Англія) розробила систему двопостової середньочастотної плавки «DUAL-TRAK». Створення таких систем дозволило збільшити ефективність використання встановленої потужності системи електроживлення печей, продуктивність плавильних установок та знизити її вартість на 30–40 % [8].

Двопостові плавильні установки типу УПД (установка плавильна двопостова) мають двоенергоканальну розподільну систему електроживлення (ДЕКР-СЕЖ), яка забезпечує режим одночасної плавки металу у двох печах. Вона дозволяє виконувати незалежне регулювання потужності на кожній печі при постійній потужності на вході системи електроживлення [9]. В цьому випадку продуктивність УПД зростає на 20–25 % у порівнянні з однопостовою.

Метод фокусування потужності в різних зонах тигля на різних стадіях плавки дозволяє інтенсифікувати металургійні процеси приготування сплавів [10].

При зсуві низькочастотних складових струму в секціях індуктора на 120 град. ел. створюються додаткові тягові зусилля в глибинних шарах ванни розплаву впродовж стінок тигля. Їх напрямок (униз або уверх) залежить від послідовності фаз низькочастотних складових струму в секціях індуктора [11].

Прикладом конструкції прохідної індукційної печі може слугувати горизонтальна піч, яка розроблена фірмою Аякс Магнетермік (США) [12]. Вона являє собою керамічний тунель, який розташований всередині горизонтального циліндричного індуктора та мають на кінцях завантажувальну та розвантажувальну ванни.

Конструкція турбоіндукційних тигельних печей (ТІП) безперервної та напівперервної дії базується на конструкціях традиційних ІП (індукційна тигельна піч), які доповнюються магнітодинамічними пристроями, які обертають метал навкруги вісі тигля [13].

Таким чином, результати аналізу дозволяють зробити висновок про те, що конструкції індукційних печей мають свої відмінності, кожне з яких направлене на покращення процесу плавки, але не на енергозбереження. Тому вивчення цього питання є перспективним.

5. Методи дослідження

Існуючі спрощені розрахункові методики класифікуються наступним чином: аналітичні рішення відповідних крайових задач, чисельні методи, інженерно-практичні підходи. На разі було застосовано фізичне моделювання в лабораторних умовах, де роль розплаву виконувала ртуть у скляній колбі та крутильні ваги. При експериментах на індукційній печі було застосовано керамічний термостійкий поплавок, який показував рух розплаву.

6. Результати дослідження

З метою проведення енергоаудиту всього процесу нагрівання та наступного плавлення металу в індукційних печах необхідно визначити його основні етапи, які мають свої характерні особливості й відповідно потребують різних затрат електроенергії. Це суттєво впливає на загальну величину енерговитрат

на одиницю продукції. На рис. 2 наведені алгоритми режимів роботи сталеплавильного комплексу на базі індукційного перетворення електричної енергії.



Рис. 2. Алгоритми режимів роботи сталеплавильного комплексу на базі індукційного перетворення електричної енергії

Зважаючи на те, що більшість металів і їхніх сплавів, які використовуються в машинобудуванні, мають незначну магнітну й електричну анізотропію, їх можна віднести до ізотропних. У немагнітних струмопровідних матеріалах магнітна анізотропія відсутня, але їхні електричні властивості вважаються ізотропними. На підставі цього під час здійснення розрахунків електромагнітного стану струмопровідних елементів індукційної печі (струмопровід, магнітопровід, матеріал, що нагрівається (плавиться)) магнітні й електричні властивості можна вважати ізотропними. А у середовищах, які не проводять електричний струм (повітря, термоізоляція й ін.) струми провідності незначні у порівнянні зі струмами зсуву. Наявність ефекту затримки пояснюється присутністю струмів зсуву [14].

Джерело змінного електромагнітного поля в струмопроводі (індукторі) випромінює в навколишнє середовище електромагнітні хвилі, розповсюдження яких у неструмопровідних елементах індукційної печі може бути охарактеризоване за допомогою функції затримання:

$$Q \sim e^{i\omega\left(\frac{r}{u}\right)} = e^{i\omega r} \left(1 - \frac{i\omega r}{u} + \dots\right), \quad (1)$$

де $\frac{r}{u}$ – час затримки, протягом якого електромагнітна хвиля проходить відстань r ; u – швидкість розповсюдження електромагнітного поля в непровідному середовищі; ω – частота збудовального поля.

Існуючі індукційні печі класифікують за конструктивним виконанням, сферою застосування й енергетичними параметрами. До основних енергетич-

них параметрів, які необхідно враховувати при проектуванні, належать: стала потужність, частота струму, ККД, допустима максимальна температура, час, який необхідний для завершення повного металургійного циклу.

Але не дивлячись на конструктивне різноманіття, вони мають спільні загальні характеристики щодо процесу перетворення енергії електромагнітного поля в теплову енергію.

Як відомо, для визначення енергетичних характеристик індукційної печі задіяні такі показники: електричний, тепловий, загальний ККД, які можливо розрахувати за наступними формулами:

$$\eta_e = \frac{P_2}{P_e}, \quad (2)$$

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_2} = \frac{P_m}{P_m + \Delta P_m}, \quad (3)$$

$$\eta_0 = \eta_e \cdot \eta_m, \quad (4)$$

де P_2 – повна потужність, яка передається безпосередньо металу, що нагрівається;

P_e – електрична потужність, яка підведена до індуктора;

P_m – корисна потужність;

ΔP_m – потужність теплових втрат.

Величина η_0 промислових індукційних печей, як правило, знаходиться в межах 0,42–0,72 і в значній мірі залежить від:

- конструктивного виконання основних елементів індукційних печей;
- властивостей матеріалу, що нагрівається, у досліджуваному випадку $\eta_e=0,6\dots0,8$, $\eta_m=0,7\dots0,9$;
- технологічних параметрів режимів металургійного процесу (швидкість нагрівання, максимальна температура плавлення й ін.).

З метою забезпечення стабільних робочих режимів, лімітованих за температурою та рівнем еквівалентних напруг, було проведено дослідження конструктивно-технологічних параметрів промислової індукційної печі. Це дало можливість визначити величину механічних зусиль і теплоутворення в основних її елементах. Проведено аналіз температурних полів і напружено-деформованого стану в матеріалі, що нагрівається.

Для вирішення поставленого завдання з урахуванням поєднання електро-термомеханічних ефектів необхідно застосувати математичну модель [15, 16], що представлена зв'язаною системою наступних рівнянь:

$$\operatorname{rot} \mu^{-1} \operatorname{rot} \vec{E} = -i\omega\gamma(\vec{E} - \vec{E}_0), \quad (5)$$

$$\operatorname{rot} \gamma^{-1} \operatorname{rot} \vec{H} = -i\omega\mu\vec{H}, \quad (6)$$

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0, \quad (7)$$

$$\operatorname{div} \mu\vec{H} = 0, \quad (8)$$

де μ – магнітна проникливість; γ – питома електропровідність.

При формуванні граничних умов у конкретному випадку необхідно врахувати специфіку електромагнітних полів в індукційних печах, а точніше: для близьких електромагнітних полів на достатній відстані від індуктора ($r > r_0$) можливо застосувати умови повного екранування:

$$\frac{\partial \bar{E}(\bar{r}_0)}{\partial n} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \bar{H}(\bar{r}_0)}{\partial n} = 0, \quad (10)$$

або повного затухання:

$$\bar{E}(\bar{r}_0) = 0, \quad (11)$$

$$\bar{H}(\bar{r}_0) = 0. \quad (12)$$

Умови спряження відображаються відносно векторів комплексних амплітуд \bar{E} і \bar{H} [13]:

$$\bar{n} \cdot (\bar{E}_l - \bar{E}_m) = 0, \quad (13)$$

$$n \cdot (\mu_l^{-1} \text{rot } E_l \text{ rot } \bar{E}_m) = 0, \quad (14)$$

$$\bar{n} \cdot (\bar{H}_l - \bar{H}_m) = 0, \quad (15)$$

$$\bar{n} \cdot (\gamma_l^{-1} \text{rot } \bar{H}_l - \gamma_m^{-1} \text{rot } \bar{H}_m + \bar{E}_{0m}) = 0. \quad (16)$$

Таким чином сформульовані крайові задачі для визначення векторів комплексних амплітуд напруженостей \bar{E} і магнітного \bar{H} полів в основних елементах індукційної печі.

Теплові розрахунки необхідно проводити як у випадку нестационарної теплопровідності, так і неізотермічної термоупругопластичності в рамках теорії течії з ізотропним зміцненням, асоційованої [14, 15] умовами Мізеса:

$$\text{div}[\lambda(T) \text{grad } T] + Q_1 + Q' = \rho c \left(T \frac{\partial T}{\partial t} \right), \quad (17)$$

$$\text{div } \hat{\sigma} + \bar{F}_1 + \bar{F}' = 0, \quad (18)$$

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\bar{\nabla} \bar{u} + \bar{u} \bar{\nabla}), \quad (19)$$

$$\hat{\varepsilon} = \hat{\varepsilon}^e + \hat{\varepsilon}^p + \hat{\varepsilon}^T, \quad (20)$$

$$\hat{\varepsilon}^e = \frac{1}{E} [(1+V) \hat{\sigma} - 3V \sigma_0 \hat{I}], \quad (21)$$

$$d\hat{\varepsilon}^p = \frac{3}{2} \frac{d\hat{\varepsilon}_i^p}{\sigma_i} \hat{s}, \quad (22)$$

$$\hat{\varepsilon}^T = a\Delta T\hat{I}, \quad (23)$$

де \bar{u} – вектор переміщень;

$\hat{\sigma}$, $\hat{\varepsilon}$ – тензори напружень та деформацій;

\hat{s} – девіатор тензора напружень;

$\hat{\varepsilon}^e$, $\hat{\varepsilon}^p$, $\hat{\varepsilon}^T$ – тензори пружної, пластичної і температурних складових деформацій;

$d\varepsilon_i^p$ – інтенсивність нарощування пластичних деформацій;

σ_i – інтенсивність напружень;

σ_0 – середнє значення напружень;

\bar{F}_1 , Q_1 – опосередковані за періодом τ складові пондемоторної сили та джерел джоулевого тепла;

\bar{F}' , Q' – об'ємні силові та теплові впливи неелектромагнітного походження;

ρ – щільність матеріалу, що нагрівається;

c – стала теплоємності;

λ – коефіцієнт теплопровідності;

E – модуль Юнга;

V – коефіцієнт Пуасона;

a – коефіцієнт температурного розширення.

Вплив електромагнітного поля на елементи індукційної печі характеризується пондемоторними силами \bar{F} і джерелами джоулевого тепла сталої потужності Q [16]. Для електропровідних феромагнітних матеріалів елементів індукційної печі маємо:

$$\bar{F} = \gamma\mu\bar{E}' \cdot \bar{H} + \frac{\mu - \mu_0}{\mu} \text{grad}(\mu^2 \bar{H} \cdot \bar{H}), \quad (24)$$

$$Q = \gamma\bar{E}' \cdot \bar{E}', \quad (25)$$

де $\bar{E}' = \bar{E} + \bar{E}_0$.

У випадку квазіусталених електромагнітних полів з діючим значенням комплексних амплітуд \bar{E}' і \bar{H} , відображення пондемоторних сил і сталої потужності джоулевого тепла можливо [13] у вигляді суми опосередкованих за період $\tau = \frac{2\pi}{\omega}$. А також періодичних у часі складових:

$$F' = F_1' + F_2', \quad (26)$$

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (27)$$

де

$$\bar{F}_1 = \frac{\gamma\mu}{2} (\bar{E}' \cdot \bar{H}^* + \bar{E}^* \cdot \bar{H}) + \frac{\mu - \mu_0}{\mu} \text{grad}(\mu^2 \bar{H} \cdot \bar{H}^*), \quad (28)$$

$$\bar{F}_2 = \frac{\gamma\mu}{2} (\bar{E}' \cdot \bar{H} e^{2i\omega t} + \bar{E}'^* \cdot \bar{H}^* e^{-2i\omega t}) + \frac{\mu - \mu_0}{2\mu} \text{grad}(\mu^2 (\bar{H} \cdot \bar{H} e^{2i\omega t} + \bar{H}^* \cdot \bar{H} e^{-2i\omega t})), \quad (29)$$

$$Q_1 = \gamma \vec{E}' \cdot \vec{E}'^*, \quad (30)$$

$$Q_2 = \frac{\gamma}{2} \left(\vec{E}' \cdot e^{2i\omega t} + \vec{E}'^* \cdot \vec{E}' e^{-2i\omega t} \right), \quad (31)$$

Необхідно відмітити той факт, що періодичні за часом \vec{F}_2 , Q_2 викликають механічні коливання (вібрацію) конструктивних елементів індукційної печі, чим пояснюється «гул» при її роботі. Для зменшення шкідливої дії коливань і запобігання ефекту саморуйнування індукційної печі рекомендовані заходи щодо міцного надійного закріплення основних її елементів [17].

З метою перевірки правильності наведених теоретичних викладок були неодноразово проведені відповідні досліди як у лабораторних умовах, так і на промисловому устаткуванні в умовах реального виробництва.

Дослід № 1 – Перевірка дії електромагнітного поля на розплав металу в лабораторних умовах.

В якості розплаву металу була використана ртуть, яка має всі аналогічні властивості. Скляну посудину, в якій знаходилася ртуть, помістили всередину циліндричного індуктора. В якості вимірювального приладу використані крутильні ваги, «крилатка» яких виготовлена з фторопласту і занурена в ртуть. Це дало можливість дослідити вплив електромагнітного поля на «розплав металу».

Під час проведення експерименту була виявлена залежність глибини проникнення електромагнітного поля залежно від частоти струму: зі зменшенням частоти струму, що живить індуктор ($f < 50$ Гц), глибина проникнення збільшується і навпаки ($f > 50$ Гц) глибина проникнення зменшується. Також підтверджено, що максимальна дія електромагнітного поля на розплав зосереджена всередині (по висоті) розплаву (рис. 3).

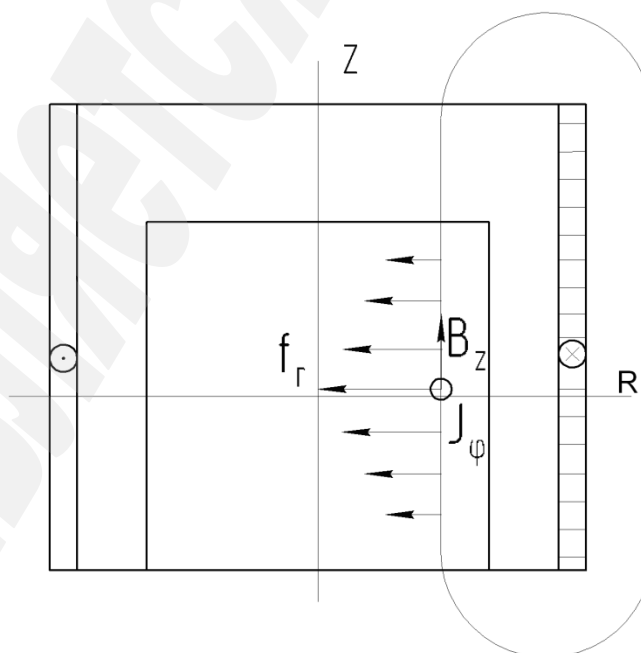


Рис. 3. Розподілення електромагнітних величин в середині індуктора

Як негатив слід віднести появу сферичної «шапки» на поверхні розплаву, яка має «лишину» в центрі, на якій не утримується шлак і тому він не може захистити центральну частину поверхні від інтенсивного небажаного окислення. Внаслідок чого погіршується якість готової продукції. На сьогодні цей дефект можливо усунути тільки у вакуумних індукційних печах невеликої потужності.

Дослід № 2 – Дослідження впливу електромагнітного поля на траєкторії та швидкість руху розплаву металу (сплаву) в індукційній печі.

Зважаючи на те, що температура плавлення металу (сплаву) достатньо велика 1000...1500 °С (залежно від марки), а течії та рухи, що виникають у середині розплаву під дією електромагнітного поля й температури, мають здебільшого хаотичний характер, дослідити їх траєкторії та швидкість руху з високою достовірністю неможливо. Тому було використано метод приблизної візуальної апробації.

Для цього був виготовлений спеціальний термопоплавок з керамічної термостійкої втулки, всередину якої був вставлений стрижень з вольфраму (рис. 4). Для більшої достовірності експерименту вага поплавок дорівнювала вазі розплаву такого ж об'єму. Тобто фактично на поплавок в основному поширювалась дія електромагнітних полів, які пронизували вольфрамовий стрижень і змушували його рухатися за своєю траєкторією.

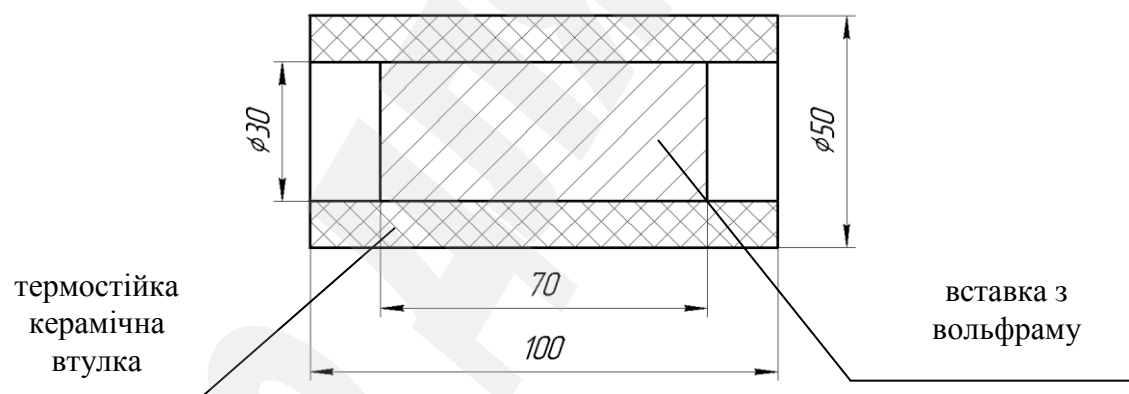


Рис. 4. Будова «поплавок»

Вплив температурних полів фізично повністю ліквідувати неможливо, але похибки від їх дії, особливо на завершальній стадії плавлення не суттєві через фактичну рівномірність температури сплаву. Тому основна увага приділялася впливу електромагнітного поля протікання розплавлення й отримання можливостей керування металургійним процесом за заданою програмою з метою максимального зменшення споживання електроенергії.

Під час проведення експерименту на промисловій індукційній печі було виявлене наступне:

– на початковій стадії металургійного процесу в першу чергу оплавляються поверхневі частини шматків металу. «Рідина» поступово «стікає» на дно печі, а тверді частки під дією електромагнітного поля починають «плавати» в утвореній рідині. Цим прискорюється подальше розплавлення всього об'єму, що завантажений у піч;

– після повного розплавлення на стадії витримки при заданій температурі (розкислення) в розплав був занурений термопоплавок, який періодично з'являвся на поверхні та зникав у глибині. На рис. 5 наведена зміна умов теплової роботи індукційної сталеплавильної печі у різні періоди й етапи плавлення.

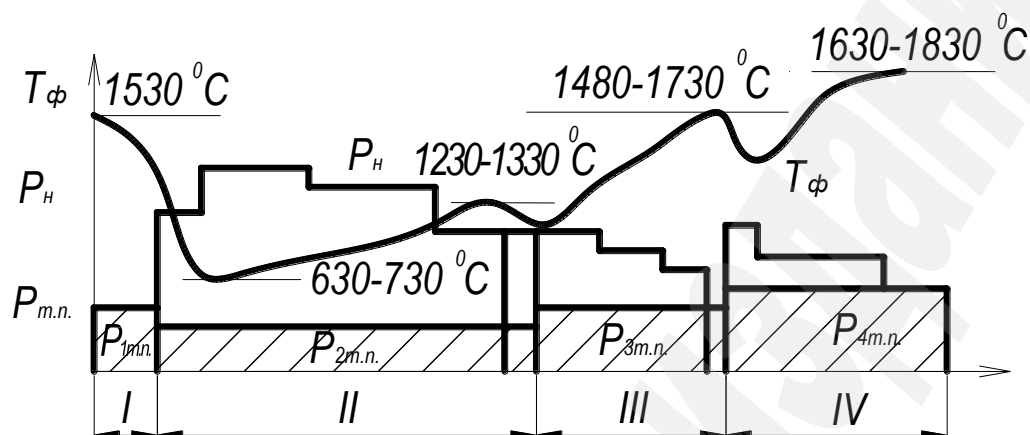


Рис. 5. Зміна умов теплової роботи індукційної сталеплавильної печі у різні періоди й етапи плавлення: I – підготовка печі; II – плавлення; III – окислювання; IV – відновлювання; T_{ϕ} – фактична температура, P_n – номінальна потужність, $P_{m.n.}$ – потужність технологічного процесу для відповідного періоду

Не дивлячись на хаотичність появи на поверхні та потопання термопоплавка вдалося виявити таку закономірність: зі зменшенням частоти струму $f < 50$ Гц він появлявся на поверхні рідше і наближався до геометричної середини індукційної печі. Навпаки, при збільшенні частоти струму $f > 50$ Гц він появлявся частіше, але на значній відстані від геометричної середини індукційної печі.

За результатами проведеного дослідження можна зробити наступний висновок: дія електромагнітного поля за весь період металургійного циклу носить позитивний характер. Для досягнення максимальних показників енергозбереження воно повинно бути керованим за величиною і частотою струму, який його створює залежно від фактичного стану окремих циклів металургійного процесу.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Проведені теоретичні та лабораторно-практичні дослідження електротермомеханічних процесів у промислових індукційних печах показали, що існують резерви підвищення енергоефективності, які необхідно використати, поєднуючи математичне моделювання з практичним досвідом експлуатації.

До позитивних характеристики індукційних печей слід віднести ефект постійного перемішування розплаву під дією електромагнітного поля, який дає можливість отримати високу однорідність структури сплаву та скоротити час їх роботи.

Weaknesses. Для отримання суттєвих результатів при розробці заходів з економії електроенергії в процесах плавлення металів (сплавів) індукційним способом необхідно орієнтуватися на світові досягнення з використанням комп'ютерної техніки.

Opportunities. Рекомендується впровадження принципово нових підходів до проектування індукційних печей і розробки сучасних енергоефективних технологічних процесів з використанням пакетів комп'ютерних програм, аналогічних, наприклад:

- VEM Antriebstechnik (Німеччина) для вибору компонентів електроустаткування;
- OPAL (Швейцарія) зі складними процедурами моделювання й ідентифікації;
- CTSizing (фірма Control Techniques, США) для контролю за технологічним процесом.

Це дозволить спеціалістам, конструкторам, технологам, металургам ще на стадії проектування визначити техніко-економічні показники їх роботи та передбачити заходи для підвищення енергоефективності.

Threats. До загроз можна віднести:

- ускладнення конструкції індукційної печі;
- збільшення затрат на проектування та на розробку програмного забезпечення.

8. Висновки

1. Завдяки проведеним дослідям в лабораторних умовах та на печі було розроблено алгоритм режимів роботи електричного індуктора. Проведено аналіз режимів роботи індуктора на різних частотах. Виявлено вплив частоти струму, який живить індуктор на глибину проникнення електромагнітного поля. Зі зменшенням частоти струму ($f < 50$ Гц) глибина проникнення збільшується і навпаки, при збільшенні ($f > 50$ Гц) – зменшується. Також підтверджено, що максимальна дія електромагнітного поля на розплав зосереджена всередині (по висоті) розплаву.

2. Показано розподілення електромагнітного поля всередині індуктора та його вплив на елементи індукційної печі. Воно утворює електродинамічні сили, направлені всередину. Виявлено умови роботи печі з зазначенням фактичної температури на різних етапах плавлення (від 630 °C до 1830 °C).

3. Виготовлено спеціальний термопоплавок для дослідження руху розплаву металу. Поплавок складається з керамічної термостійкої втулки, всередину якої був вставлений стрижень з вольфраму. Для більшої достовірності експерименту вага поплавка дорівнювала вазі розплаву такого ж об'єму.

Література

- 1 Зеркалов Д. В. Правова основа енергозбереження: довідник. К.: Дакор, 2008. 480 с.
- 2 Установки индукционного нагрева / Сухоцкий А. Е. и др. Л.: Энергоиздат, 1981. 274 с.
- 3 Головин Г. Ф., Зимин Н. В. Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева. Л.: Машиностроение, 1979. 120 с.
- 4 Ректорис К. Вариационные методы в математической физике и технике. М.: Мир, 1985. 590 с.
- 5 Автоматизированная программная система обслуживания конечноэлементных расчётов / Цыбенко А. С., Кащенко Н. Г., Крищук Н. Г. Лавендел Ю. О. Киев: Высшая школа, 1986. 340 с.

6 Труфанов И. Д., Андрияс И. А., Пачколин Ю. Э. Математическое моделирование энергетического поля сталеплавильного агрегата с комбинированным электротехническим комплексом // Электротехника и электроэнергетика. 2003. № 1. С. 66–71.

7 Викер Х. Автоматизация плавки в литейном производстве // Литейное производство. 1994. № 6. С. 26–32.

8 Мортимер Д. Х. Завтрашние технологии индукционной плавки существуют уже сегодня // Литейщик России. 2002. № 1. С. 32–37.

9 Многоинверторные среднечастотные преобразователи в системах электропитания индукционных установок / Лузгин В. И., Петров А. Ю., Шипицын В. В., Якушев К. В. // Электротехника. 2002. № 9. С. 57–63.

10 Траузель Д., Шлюкабер А., Донбах Ф. Реализация секционных технологических и металлургических задач в индукционных печах средней частоты // Литейщик России. 2003. № 5. С. 20–23.

11 Устройство для индукционного нагрева и способ его управления: Патент 2231904 Российской Федерации / Лузгин В. И., Петров А. Ю., Черных И. В., Шипицын В. В., Якушев К. В. Опубл. 27.03.04, Бюл. № 9.

12 Continuous melting in horizontal induction furnace // Electrical Review. 1971. Vol. 188, Issue 9. P. 273–274.

13 Многофункциональный плавильный агрегат для реализации новых технологий в условиях мини металлургических предприятий и литейных цехов крупных машиностроительных заводов / Сарапулов Ф. Н., Лузгин В. И., Петров А. Ю. и др. // Литейщик России. 2004. № 10. С. 23–29.

14 Туровский Я. Электромагнитные расчёты элементов электрических машин: пер. с польск. М.: Энергоатомиздат, 1986. 200 с.

15 Победря Б. Е. Численные методы в теории упругости и пластичности. М.: Моск. ун-т, 1981. 344 с.

16 Метельський В. П., Пачколін Ю. Е. Електродинамічні сили в електротехнічних комплексах з індукційно-дуговим перетворення електроенергії // Електротехніка та електроенергетика. 2005. № 2. С. 41–47.

17 Дослідження вібрацій індукційних електротермічних комплексів на стійкість конструктивних елементів печей / Єршов А. В., Пачколін Ю. Е., Коцур І. М., Бондаренко О. О. // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2012. № 2/5 (56). С. 56–58. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3734>