
ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, МЕХАНІЗАЦІЇ ТА КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ

УДК 669.2/8.017: 537.3.39

К. О. Костик, докт. техн. наук, проф.;

e-mail: Kateryna.Kostyk@khp.edu.ua; ORCID 0000-0003-4139-9970

Д. П. Терентьев, магістр

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНДУКЦІЙНОЇ ТИГЕЛЬНОЇ ПЕЧІ ПРИ ВИПЛАВЦІ СТАЛІ

Застосування індукційних нагрівальних печей дозволяє автоматизувати процеси плавки, отримувати високо леговані сталі, забезпечувати хороші умови праці для обслуговуючого персоналу. До того ж максимально знижується забруднення навколишнього середовища. Індукційні печі використовують при плавці металів принципово інший метод нагріву. Завдяки цьому, удосконалилася і технологія плавки, розширилися можливості переплавки металів з брухту. У роботі розглянуто наукові методи розрахунку електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі ІТП-4,5 для виплавки легованої сталі 35ХМЛ. В якості вихідних даних враховували властивості легованої сталі; розміри шматків шихти; вихідну температуру шихти; температуру плавлення і температуру розливання; питомі електроопору шихти; ентальпію, теплоємність і приховану теплоту плавлення сплаву; параметри джерел живлення та ін. Отримано залежність частоти генератора від розмірів кускової шихти для виплавки легованої сталі 35ХМЛ, а також залежність розмірів кускової шихти, що завантажуються в піч для виплавки сталі, і число витків індуктора від частоти плавильної установки. Визначено залежності основних електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі, таких як настилу струму, повної потужності системи «індуктор-метал» і сили струму в індукторі від частоти генератора. Отримано рівняння залежностей настилу струму, потужності системи «індуктор-метал», сили струму від частоти методом апроксимації поліномом другого і третього ступенів в інтервалі частот генератора від 300 до 1000 Гц з перевіркою адекватності моделі за коефіцієнтом кореляції. Причому отримані залежності можна використовувати як номограми для визначення основних електромагнітних параметрів печі, показників шихти, індуктора і частоти установки, що може мати практичне значення у виробництві для прискорення і поліпшення якості процесу виплавки потрібного сплаву.

Ключові слова: індукційний метод нагріву, індукційна тигельна піч, кускова шихта, сталь, електромагнітні параметри.

Застосування індукційних нагрівальних печей дозволяє автоматизувати процеси плавки, отримувати високо легуючі метали, забезпечувати хороші умови праці для обслуговуючого персоналу. До того ж максимально знижується забруднення навколишнього середовища. Індукційні печі використовують при плавці металів

ISSN 0235-5884. Процеси лиття. 2021. № 2 (144)

принципово інший метод нагріву. Завдяки цьому удосконалилася технологія плавки розширилися можливості переплавлення металів з брухту [1–3].

Робота індукційних печей побудована за принципом виділення тепла металом при проходженні через нього електричного струму. Таким чином, нагрів відбувається не за рахунок теплових хвиль, що досягають металу, а за рахунок перетворення металевої маси в самостійне джерело виділення тепла. Для створення електромагнітного поля в печі використовується індуктор. Узв'язку з цим застосовуваний принцип плавки позначається як індукційний нагрів. Індуктор входить в конструкцію плавильного агрегату [2].

Обов'язкова умова ефективної роботи печі – продумана система охолодження. До печі необхідно одночасно підвести і електропостачання для нагріву металів, і воду для охолодження самого індуктора. При використанні індукційних печей значно підвищується зручність і якість плавки металів. Під впливом електромагнітного потоку в розплавленій масі металу посилюється циркуляція. Це сприяє підвищенню однорідності, отриманого в результаті плавки, металу. Крім того, плавильні печі, що використовують принцип індукційного нагріву, дають на виході метал з більш високими показниками і чистоти, і однорідності. Підвищення якості металу доповнюється зниженням собівартості всього процесу плавки. Досягається це за рахунок економії електроенергії, що витрачається на весь процес переплавки металів. Високий коефіцієнт корисної дії роботи печей подібного типу – ще одна додаткова умова, що приводить до зниження виробничих витрат [3].

На даний момент в промисловості частіше використовуються індукційні печі високої частоти. Однак, середньочастотні печі також мають свої переваги. Вони дозволяють знизити витрати електроенергії майже в два рази. Індукційні печі середнього нагріву відрізняються стисненим тимчасовим циклом плавки (від 40 до 45 хвилин). Це досягається за рахунок того, що значно підвищена межа допустимої потужності в таких печах. При використанні печей цього типу розширюються можливості вдосконалити технологію плавки металів [4].

В даний час на підприємствах використовується близько 23 % індукційних печей, а 76 % припадають на газові вагранки. Широкомасштабне впровадження на виробництвах обладнання для індукційної плавки дозволить значно підвищити ефективність всього процесу і його продуктивність відіб'ється на якості одержуваного металу.

Індукційний метод нагріву і плавки сплавів, пройшовши більш, ніж столітній, шлях розвитку, зарекомендував себе як найбільш ефективний спосіб безконтактного підведення тепла в електропровідне середовище. Індукційна плавка набула виключно широкого поширення як за кількістю діючих установок, так і за різноманітністю технологічних застосувань в найрізноманітніших областях техніки. За масою розплаву вони розрізняються від декількох грамів в установках височастотної плавки до 250 т чавуну в каналному міксері. За методами індукційної плавки, залежно від розв'язуваних завдань, установки розрізняються за своїми фізичними основами, принциповою технологічною схемою і конструкції обладнання. Їх можна розділити на дві основні групи: плавка металів в футерованій ванні і плавка без зіткнення розплаву з футеровкою. Методи першої групи реалізуються в індукційних тигельних (ІТП) і каналних (ІКП) печах. Методи другої групи використовуються в печах левітаційної плавки в зваженому стані металу, в печах безтигельної зонної плавки, а також в печах з холодним тиглем [3–5].

В процесі плавки сплаву в ІТП найбільш повно проявляються переваги і ефективність індукційного методу плавки: внутрішній розігрів шихти, розподіл виділеної енергії, здебільшого периферії садки, інтенсивне перемішування металу, високий ККД і відносно мала витрата електроенергії на тону виплавленого металу.

Широке поширення в ливарному виробництві отримали індукційні тигельні печі завдяки низькій питомій собівартості і високій якості одержуваного металу [4]. Однією з основних тенденцій у розвитку індукційного плавильного обладнання є підвищення продуктивності в одиниці обладнання і необхідність отримання великих кількостей металу, що зумовило зростання місткості і потужності печей, що досягли 63 т при

Проблеми автоматизації, механізації та комп'ютеризації процесів лиття

потужності 18000 кВт для плавки карбїду залїза на промисловїй частотї (фїрма ASEA – Швеція, освоїла випуск таких печей в 60-х роках). Однак для великих ІТП лїмітується питома потужність до 300 кВт/т надмірно інтенсивним рухом металу під дією електродинамічних сил [4, 5].

Подальше підвищення інтенсивності плавки і продуктивності ІТП стало можливим при збільшенні частоти струму в індукторї від 50 до 500 Гц для великих печей, а по мїрі зменшення розмірів печї раціональна частота збільшується і досягає 1,0–10,0 кГц для печей місткістю 10–400 кг. Для малих печей місткістю кілька десятків грамів оптимальна частота зростає до 440 кГц [6].

Завдяки прогресу в галузі виробництва потужних напівпровідникових приладів і розвитку перетворювальної техніки напівпровідниковї перетворювачї частоти стають дешевшими і ефективнішими, порівнюючи з електромашинними генераторами в середньочастотному діапазонї [1, 4–6]. Підвищення питомої потужності в ІТП дозволяє мінімізувати час циклу плавки, підвищити ефективність використання обладнання, а також знизити енерговитрати на тепловіддачу і випромїнювання.

Таким чином, ІТП для виплавлення сплавів мають великі переваги, найважливіші з яких представляють можливість отримання вельми чистих металів і сплавів з точно заданим хїмічним складом, що сприяє стабільності властивостей одержуваного матеріалу. Індукційні тигельні печї забезпечують малий угар металу і легувальних елементів. Такї плавильні пристрої володіють високою продуктивністю, можливістю повної автоматизації. При використанні ІТП забезпечуються хорошї умови праці обслуговуючого персоналу, а також мала ступїнь забруднення навколишнього середовища [3–6].

Метою роботи є визначення електромагнітних параметрів індукційної тигельної печї місткістю 4500 кг для виплавки легованої конструкційної сталї.

Для досягнення поставлених задач в роботї розглянуто науковї методи розрахунку електромагнітних параметрів ІТП-4,5 для виплавки сталї 35ХМЛ, яка поставляється у вигляді сталїних виливків В82 (ГОСТ 977-88). Зазвичай нормалїзацію цїєї легованої сталї проводять при температурї 860–880 °С з наступним відпуском при температурах 600–650 °С для отримання твердостї матеріалу НВ 163–225. У відпаленому станї структура сталї 35ХМЛ є ферито-перлітною з деяким переважаннєм фериту. У промисловостї її використовують для виготовлення таких деталей, як шестерні, хрестовини, втулки, зубчастї вінці та інших деталей, що працюють з підвищеними навантаженнєми і вимагають підвищеної твердостї [7].

Для проведення електричного розрахунку індукційної тигельної печї ІТП-4,5 в якостї вихідних даних враховували властивостї легованої сталї 35ХМЛ; розміри шматків шихти; вихідну температуру завантажуваної шихти; температуру плавлення і температуру розливання; питомї електроопори шихти; ентальпїю, теплоємність і приховану теплоту плавлення сплаву; параметри мережї живлення та ін. [8].

Активна потужність P_2 , передана в завантаження (садку) ІТП визначається за виразом:

$$P_2 = P_{\text{пол}} + P_T, \text{ Вт} \quad (1)$$

Сумарні теплові втрати ΔP_T становлять 5–35 % корисної потужності печї $P_{\text{кор}}$, де менша цифра відноситься до індукційних тигельних печей більшої ємності. Термічний ККД (η_T) індукційної тигельної печї зазвичай становить 75–95 % [5]:

Активна потужність печї P_{II} орієнтовно визначається за виразом:

$$P_{\text{II}} = P_2 / \eta_e, \text{ Вт}, \quad (2)$$

де η_e – електричний ККД індуктора ІТП. Значення η_e може бути 75–95 % [9]. Значення ККД тим вище, чим більший питомий опір металу або сплаву, що розплавляється.

Термічний ККД індукційної тигельної печї знаходимо за виразом:

$$\eta_{\Gamma} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_2} = \frac{1200}{1282,5} \approx 0,936. \quad (3)$$

Потужність джерела живлення $P_{\text{дж}}$ повинна бути на 5–10 % більшою за активну потужності $P_{\text{п}}$. Це пов'язано з тим, що джерело живлення має покривати втрати $\Delta P_{\text{т.к}}$ в струмопідводі і в конденсаторах [9].

Потужність джерела живлення з урахуванням втрат в струмопідводі і в конденсаторній батареї визначається за виразом:

$$P_{\text{дж}} = P_{\text{п}} + P_{\text{т.к}}. \quad (4)$$

Приймаємо потужність втрат $\Delta P_{\text{т.к}} = 141,23$ кВт (9,36 % від активної потужності печі). Розрахуємо частоту джерела живлення і виберемо джерело живлення індукційної тигельної печі. Враховуючи, що при нагріванні сталі змінюються її питомий опір і магнітна проникність, за вихідне значення магнітної проникності приймаємо 16, що пояснюється застосуванням при індукційному нагріванні вельми сильних магнітних полів [9, 10].

Вибираємо частоту і потужність джерела живлення з урахуванням розмірів кускової шихти $d_{\text{ш}} = 0,03\text{--}0,07$ м. Одержану залежність частоти від розмірів кускової шихти можна представити рівнянням поліному третього ступеня з перевіркою величини достовірності апроксимації R , яке вказане на рис. 1. Графік показує, що для нагріву кускової шихти з середнім розміром близько 5 см, необхідна частота генератора не менше 1000 Гц.

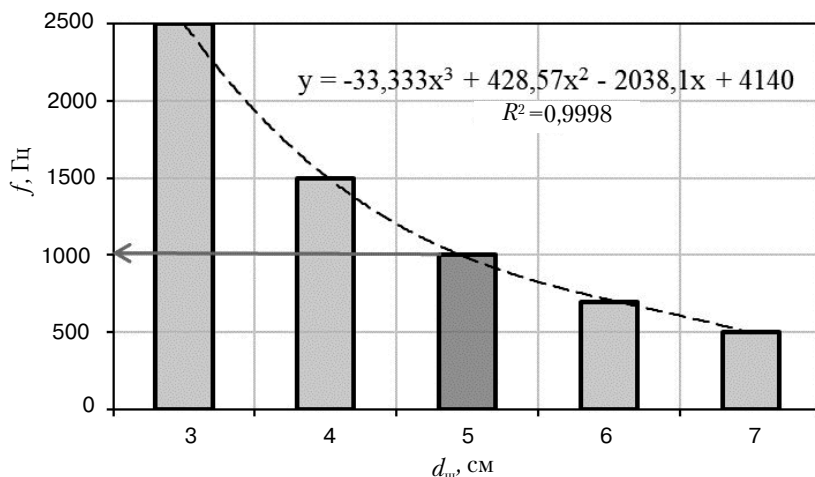


Рис. 1. Визначення зміни частоти f генератора від розмірів кускової шихти $d_{\text{ш}}$

Якщо ж використовується кускова шихта розміром 3 см, то мінімально допустима частота генератора зростає до 2500 Гц, а якщо використовується кускова шихта розміром 7 см, то мінімально допустима частота генератора знижується до 500 Гц. Тобто, при роботі ІТП треба вибирати таку робочу частоту генератора, щоб отримати якісні показники індукційної ливарної установки для забезпечення ефективного нагріву шихти і плавки за коротку тривалість часу.

Таким чином, для середнього значення розміру кускової шихти $d_{\text{ш}} = 5$ см, згідно отриманої залежності (рис. 1), вибираємо частоту $f = 1000$ Гц.

Враховуючи активну потужність $P_{\text{м}}$, що виділяється в металі, визначаємо настил струму від частоти (рис. 2) з виразу:

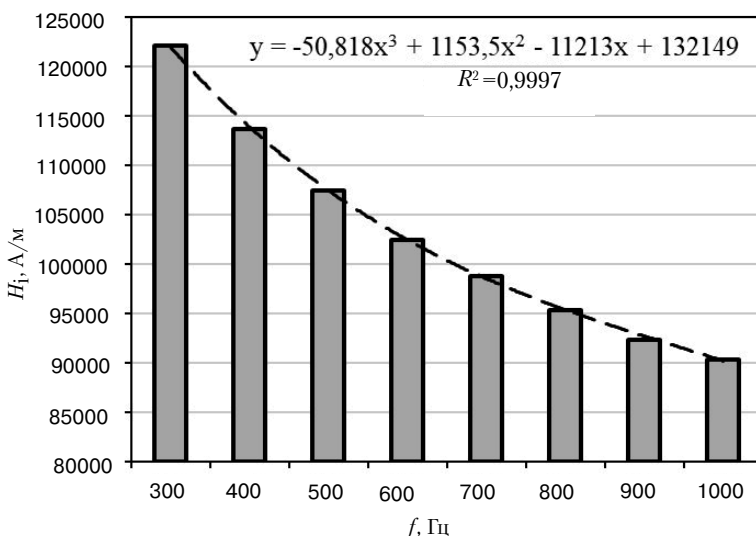


Рис. 2. Визначення настилу струму H_i від частоти f генератора

$$H_i = \frac{400}{k_{TP}} \sqrt{\frac{P_M}{D_2 \alpha_2 \sqrt{\rho_M \mu_M} f \cdot k_{MP}}} \quad (5)$$

Загальна активна потужність системи «індуктор-метал» залежить від активних потужностей, що втрачаються в індукторі і в металі:

$$P = P_C + P_i, \text{ кВт.} \quad (6)$$

Загальна реактивна потужність системи «індуктор-метал», що виникає в металі, в індукторі, в зазорі між індуктором і тиглем, має сумарне значення:

$$Q = Q_C + Q_3 + Q_i, \text{ кВ}\cdot\text{А.} \quad (7)$$

Визначаємо силу струму в індукторі I за виразом:

$$I = \frac{S \cdot 10^3}{U_i}, \text{ А,} \quad (8)$$

де S – повна потужність системи індуктор–метал:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \text{ кВ}\cdot\text{А.} \quad (9)$$

Зміни повної потужності S системи індуктор–метал і сили струму I в індукторі від частоти струму f зображені на рис. 3.

З графіків (рис. 3) видно, що з підвищенням частоти струму f від 300 до 1000 Гц повна потужність S системи індуктор–метал зростає від 17890 до 30800 кВ·А, а сила струму I в індукторі підвищується від 11930 до 20530 А відповідно.

Одержано рівняння залежностей (рис. 3, б) потужності $S(f)$ та сили струму $I(f)$ методом апроксимації поліномом другого ступеня в інтервалі частот генератора від 300 до 1000 Гц з перевіркою адекватності моделі за коефіцієнтом кореляції (R).

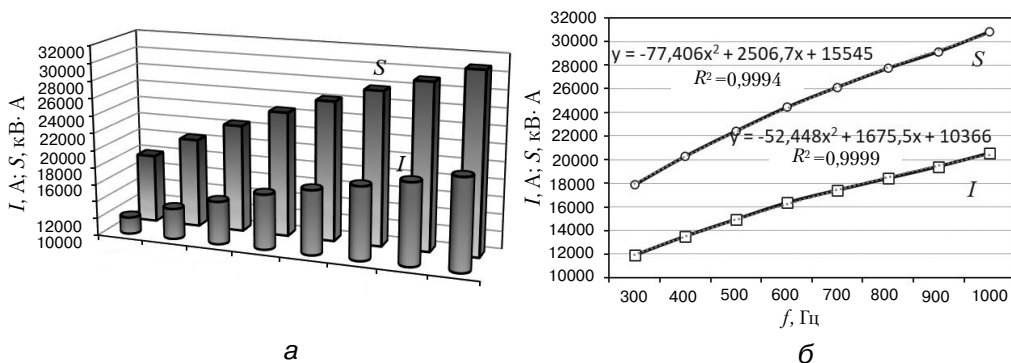


Рис. 3. Зміни повної потужності S системи «індуктор-метал» і сили струму I в індукторі від частоти струму f : а – гістограми зміни S і I ; б – отримані рівняння залежностей зміни $S(f)$ та $I(f)$

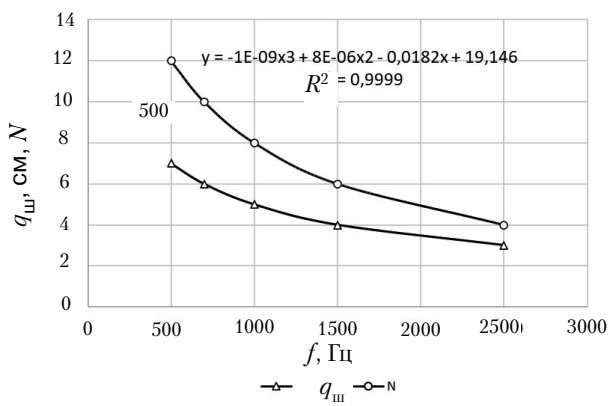


Рис. 4. Залежність розмірів кускової шихти $d_{ш}$ і числа витків індуктора N від частоти f

Число витків індуктора визначаємо за виразом:

$$N = \frac{U_i}{U_i'} \quad (10)$$

де U_i – напруга джерела живлення, що підводиться до індуктора.

Одержано залежність розмірів кускової шихти, що завантажується в піч для виплавки сталі, і число витків індуктора N від частоти f (рис. 4).

Число витків індуктора від частоти генератора змінюється за рівнянням поліному третього

ступеня (рис. 4). Причому, одержані залежності можна використовувати як номограми для визначення необхідних показників шихти, індуктора або частоти установки, що може мати практичне значення на виробництві для прискорення і поліпшення якості процесу виплавки потрібного сплаву.

Висновки

Одержано залежність частоти генератора від розмірів кускової шихти для виплавки легованої сталі 35ХМЛ, а також залежність розмірів кускової шихти, що завантажується в піч для виплавки сталі, і число витків індуктора від частоти плавильної установки.

Одержано залежності настилу струму, повної потужності системи «індуктор-метал» і сили струму в індукторі від частоти генератора.

Одержано рівняння залежностей настилу струму, потужності системи «індуктор-метал», сили струму від частоти методом апроксимації поліномом другого і третього ступеня в інтервалі частот генератора від 300 до 1000 Гц з перевіркою адекватності моделі за коефіцієнтом кореляції.

Одержані залежності можна використовувати як номограми для визначення необхідних електромагнітних параметрів печі, показників шихти сталі 35ХМЛ, індуктора або частоти установки, що може мати практичне значення на виробництві для прискорення і поліпшення якості процесу виплавки потрібного сплаву.

Список літератури

1. Шибаев Е. В., Кечин В. А. (2019). Перспективные технологии плавки и литья при изготовлении фасонных отливок. *Редакционная коллегия*, 123.
2. Швецов Л. В. (2019). История и перспективы развития литейного производства РУП" МоАЗ". *Литье и металлургия*, (3), 89–90.
3. Simeiko, K. V., Iliencko, B. K., & Sidorenko, M. A. (2019). Electrothermal fluidized bed technique using for realization of high-temperature technological processes. *Energy Technologies & Resource Saving*, (1), 35–44.
4. Долгополов, А. Е., Соколов, Б. М., Ознобихина, Н. В., & Усольцев, А. А. (2018). Концепция создания современного литейного предприятия. *Информация как двигатель научного прогресса*, 115–119.
5. Левшин, Г. Е., Малышев, И. В. (2016). Об индукционных тигельных печах и плавке. *Заготовительные производства в машиностроении*, (3), 7–13.
6. Piterek Robert. (2015). Production flexibility combats declining batch sizes. *Casting Plant and Technology International*. (3), 40–44.
7. Костик, В. О. (2014). Исторические аспекты диаграммы железо-цементит. *Технологический аудит и резервы производства*, (1 (3)), 17–19.
8. Sundus, M. A., Akimov, O., Kostyk, K. (2017). Development of an iron-based alloy with a high degree of shape recovery. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, (3/12), 87.
9. Kostyk, K. O., Akimov, O. V., Ostroverkhova, K. V. (2020). Дослідження електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі з кусковим завантаженням шихти для виплавки сталі 35Л. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Технології в машинобудуванні*, (2), 85–92.
10. Левшин, Г. Е. (2016). Научное технологии индукционной плавки в индукторных и электромагнитных тигельных печах. *Научное технологии в машиностроении*, (3(57)), 12–21.

Надійшла 27.04.2021

References

1. Shibaev E. V., Kechin V. A. (2019). Perspektivnye tehnologii plavki i litya pri izgotovlenii fasonnyh otlivok. *Redakcionnaya kollegiya*, 123. [in Russian].
2. Shvecov L. B. (2019). Istoriya i perspektivy razvitiya litejnogo proizvodstva RUP" MoAZ". *Lite i metallurgiya*, (3), 89–90. [in Russian].
3. Simeiko, K. V., Iliencko, B. K., & Sidorenko, M. A. (2019). Electrothermal fluidized bed technique using for realization of high-temperature technological processes. *Energy Technologies & Resource Saving*, (1), 35–44. [in English].
4. Dolgoplov, A. E., Sokolov, B. M., Oznobihina, N. V., & Usolcev, A. A. (2018). Konceptiya sozdaniya sovremennogo litejnogo predpriyatiya. *Informaciya kak dvigatel nauchnogo progressa*, 115–119. [in Russian].
5. Levshin, G. E., Malyshev, I. V. (2016). Ob indukcionnyh tigelnih pechah i plavke. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii*, (3), 7–13. [in Russian].
6. Piterek Robert. (2015). Production flexibility combats declining batch sizes. *Casting Plant and Technology International*. (3), 40–44. [in English].
7. Kostik, V. O. (2014). Istoricheskie aspekty diagrammy zhelezo-cementit. *Tehnologicheskij audit i rezervy proizvodstva*, (1 (3)), 17–19. [in Russian].
8. Sundus, M. A., Akimov, O., Kostyk, K. (2017). Development of an iron-based alloy with a high degree of shape recovery. *Skhidno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnolohii*, (3/12), 87. [in English].
9. Kostyk, K. O., Akimov, O. V., Ostroverkhova, K. V. (2020). Doslidzhennia elektromahnitnykh parametriv induktsiinoi tyhelnoi pechi z kuskovym zavantazhenniam shykhty dlia vyplavky stali 35L. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seria: *Tekhnolohii v mashynobuduvanni*, (2), 85–92. [in Ukrainian].

10. Levshin, G. E. (2016). Naukoemkie tehnologii indukcionnoj plavki v induktornyh i elektromagnitnyh tigelnnyh pechah. *Naukoemkie tehnologii v mashinostroenii*, (3(57)), 12–21. [in Russian].

Received 27.04.2021

K. O. Kostyk, *Dr. Sci. (Engin.), Prof.*; e-mail: Kateryna.Kostyk@khpj.edu.ua;
ORCID 0000-0003-4139-9970

D. P. Terentyev, *Master's Degree*

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» (Kharkiv, Ukraine)

FEATURES OF CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF THE INDUCTION CRUCIBLE FURNACE DURING STEELMAKING

The use of induction heating furnaces makes it possible to automate the melting processes, produce highly alloyed steels, and provide good working conditions for service personnel. In addition, environmental pollution is reduced as much as possible. Induction furnaces use a fundamentally different heating method for melting metals. Thanks to this, the melting technology has also improved, and the possibilities of remelting metals from scrap have expanded. The paper considers scientific methods for calculating the electromagnetic parameters of the ITP-4,5 induction crucible furnace for the smelting of 35CrMo alloy steel. The initial data were taken into account the properties of alloy steel; the size of the charge pieces; the initial charge temperature; the melting point and casting temperature; the specific electrical resistivity of the charge; the enthalpy, heat capacity and latent heat of melting of the alloy; the parameters of power sources, etc. The dependence of the generator frequency on the size of the lump charge for smelting 35CrMo alloy steel, as well as the dependence of the size of the lump charge loaded into the furnace for smelting steel, and the number of turns of the inductor on the frequency of the melting plant, is obtained. The dependences of the main electromagnetic parameters of the induction crucible furnace, such as the current level, the total power of the “inductor-metal” system and the current in the inductor on the frequency of the generator are determined. The equations of the dependences of the current level, the power of the “inductor-metal” system, and the current strength on the frequency are obtained by the method of approximation by a polynomial of the second and third degrees in the frequency range of the generator from 300 to 1000 Hz, with the model adequacy checked by the correlation coefficient. Moreover, the obtained dependences can be used as nomograms to determine the main electromagnetic parameters of the furnace, the parameters of the charge, the inductor and the frequency of the installation, which can be of practical importance in production to accelerate and improve the quality of the smelting process of the desired alloy.

Keywords: *induction heating method, induction crucible furnace, lump charge, steel, electromagnetic parameters.*