

КОСТИК К. О., АКИМОВ О. В., ОСТРОВЕРХОВА К. В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНДУКЦІЙНОЇ ТИГЕЛЬНОЇ ПЕЧІ З КУСКОВИМ ЗАВАНТАЖЕННЯМ ШИХТИ ДЛЯ ВИПЛАВКИ СТАЛІ 35Л

У роботі виконані розрахунки і дослідження електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі місткістю 4,5 т при виплавці залізо-вуглецевого сплаву, а саме: проведений аналіз електромагнітного впливу на розплавлення металу і розрахунки параметрів ІТП; визначені основні геометричні розміри ІТП, параметри системи індуктор-завантаження; визначені основні електромагнітні параметри печі, такі як потужність, необхідна мінімальна робоча частота джерела живлення, опір завантаження індуктора, коефіцієнт корисної дії, число витків індуктора та ін.; отримані залежності настилу струму, повної потужності системи «індуктор-метал» і сили струму в індукторі від частоти струму; розглянуті принципи дії, циркуляція залізо-вуглецевого сплаву в ІТП, представлена математична модель параметрів печі з кусковим завантаженням шихти при початковій температурі, яка враховує електромагнітний вплив, що викликає наведення вихрових струмів в металі, розігріваючих і розплавляючих метал; частоту струму мережі живлення, фізичні властивості розплавленого металу, неоднорідність властивостей металу, кусковий характер завантаження печі в початковий період плавки вуглецевої сталі 35Л. В роботі встановлена залежність розмірів кускової шихти і число витків індуктора від частоти струму; отримана залежність робочої частоти генератора для індукційної ливарної установки від розмірів кускової шихти сталі 35Л, що є найважливішим фактором, який визначає якісні показники індукційної тигельної печі та забезпечує ефективний нагрів шихти і плавки за короткий проміжок часу.

Ключові слова: індукційна тигельна піч, кускова шихта, виливок, потужність, частота струму, індуктор.

КОСТИК Е. А., АКИМОВ О. В., ОСТРОВЕРХОВА К. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ С КУСКОВОЙ ЗАГРУЗКОЙ ШИХТЫ ДЛЯ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ 35Л

В работе выполнены расчеты и исследования электромагнитных параметров индукционной тигельной печи вместимостью 4,5 т при выплавке железо-углеродного сплава, а именно: проведен анализ электромагнитного влияния на расплавление металла и расчеты параметров ИТП; определены основные геометрические размеры ИТП, параметры системы индуктор-загрузка; определены основные электромагнитные параметры печи, такие как мощность, необходимая минимальная рабочая частота источника питания, сопротивление загрузки индуктора, коэффициент полезного действия, число витков индуктора и др.; полученные зависимости настила тока, полной мощности системы «индуктор-металл» и силы тока в индукторе от частоты тока; рассмотрены принципы действия, циркуляция железо-углеродистого сплава в ИТП, представлена математическая модель параметров печи с кусковым загрузкой шихты при начальной температуре, которая учитывает электромагнитное воздействие, что вызывает наведение вихревых токов в металле, разогревающих и расплавляющих металл; частоту тока питающей сети, физические свойства расплавленного металла, неоднородность свойств металла, кусковой характер загрузки печи в начальный период плавки углеродистой стали 35Л. В работе установлена зависимость размеров кусковой шихты и число витков индуктора от частоты тока; получена зависимость рабочей частоты генератора для индукционной литейной установки от размеров кусковой шихты стали 35Л, что является важнейшим фактором, который определяет качественные показатели индукционной тигельной печи и обеспечивает эффективный нагрев шихты и плавки за короткий промежуток времени.

Ключевые слова: индукционная тигельная печь, кусковая шихта, отливка, мощность, частота тока, индуктор.

KOSTYK K. O., AKIMOV O. V., OSTROVERKHOVA K. V.

INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF INDUCTION CRUCIBLE FURNACE WITH LUMP LOADING OF CHARGE FOR 35L STEEL SMELTING

In the work of calculations and study of electromagnetic parameters of the induction crucible furnace with a capacity of 4.5 t in the smelting of iron-carbon alloy, namely the analysis of the electromagnetic influence on molten metal and calculations of ICF; it also defines main dimensions of ICF, the parameters of the system inductor-load; identifies the main electromagnetic parameters of the furnace such as power, the required minimum operating frequency of the power source, the resistance of the inductor, the efficiency, the number of turns of the inductor, etc.; the dependences of flooring is current, the full power of the system "inductor-metal" and the current in the inductor from the frequency of the current; the principles of operation, circulation of the iron-carbon alloy in ICF, the mathematical model parameters of the furnace with lump loaded at an initial temperature, which takes into account electromagnetic effects, which causes the guidance of eddy currents in the metal, warming and melt metal; the frequency of the supply network current, the physical properties of the molten metal, the heterogeneity of the metal properties, the lumpy nature of the furnace loading during the initial melting period of 35L carbon steel. The paper establishes the dependence of the size of the lump charge and the number of turns of the inductor on the current frequency; the dependence of the operating frequency of the generator for an induction foundry on the size of the lump charge of 35L steel is obtained, which is the most important factor that determines the quality indicators of the induction crucible furnace and provides effective heating of the charge and melting in a short period of time.

Keywords: induction crucible furnace, lump charge, casting, power, current frequency, inductor.

1. Вступ. На сучасному етапі розвитку промисловості, науки, техніки і технології з'явилися передумови якісного стрибка на новий рівень з появою нових матеріалів, що володіють унікальними властивостями. Використання нових матеріалів в різних сферах пов'язано з розробкою нових технологій, що дозволяють забезпечити достатню продуктивність при високій якості продукції. Електротермічні установки є однією з найбільш поширених груп і знаходять застосування в різних областях промисловості, сільському господарстві, медицині, харчовій промисловості та побуті. Електротермічні процеси пов'язані з перетворенням

електричної енергії в теплову з перенесенням теплової енергії всередині тіла або з одного обсягу в інший за законами теплопередачі. Нагрівання різних тіл, матеріалів, рідин, газів; перехід їх з одного агрегатного стану в інший може бути здійснено з використанням електротермічних установок різного виду. В даний час одним з найбільш перспективних методів плавки металів є плавка в індукційних тигельних печах (ІТП). У ньому поєднується контрольований термічний вплив на розплавлення метал з електромеханічним впливом, що викликає інтенсивне перемішування металу в тиглі. Протягом тривалого часу проводилися спроби удосконалення

© К. О. Костик, О. В. Акімов, К. В. Островерхова, 2020

ІТП. По-перше, для збільшення ефективності плавки і термічного ККД установки було запропоновано живити даний агрегат струмами середньої і підвищеної частоти, збільшуючи тим самим питому потужність установки в порівнянні з варіантом живлення від джерел промислової частоти. По-друге, робилися спроби управління рухом розплаву різними способами. Таким чином, ІТП є агрегатом подвійної дії – високоефективною плавильною установкою з можливістю управління рухом розплаву для отримання рівномірного розподілу домішок (легуючих добавок) в процесі плавки. Для аналізу електромагнітного впливу на розплавлення металу і розрахунку параметрів і інтегральних характеристик ІТП необхідно мати модель, що враховує весь комплекс впливів, а саме: електромагнітний вплив, що викликає наведення вихрових струмів в металі, розігрівуючих і розплавляючих нагріваний метал; тепловий вплив, що полягає у формуванні заданої картини температурного поля в ІТП; гідродинамічний вплив, що впливає в значній мірі на технологічні параметри плавки. Математична модель також повинна враховувати схеми включення обмоток індуктора, частоту мережі живлення, фізичні властивості розплавленого металу і сплавів, неоднорідність властивостей металу і футеровки по радіусу і осі індуктора печі, кусковий характер завантаження печі в початковий період плавки.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Основою будь-якого індукційного пристрою є індуктор, який створює електромагнітне поле з заданими параметрами в обсязі, зайнятому провідним завантаженням (вторинним елементом). Тип пристрою визначається видом і властивостями вторинного елемента. Велику групу складають пристрої з провідним дисперсним або дрібнокусовим вторинним елементом. Індуктор виконує відповідну технологічну операцію шляхом електромеханічного впливу на провідні частинки. Сюди ж можна віднести і індукційну тигельну піч (ІТП) на початковій стадії роботи, коли здійснюється індукційний нагрів завантаження, що складається з окремих провідних шматків шихти [1–2]. Режими роботи установок індукційного нагріву складних складових заготовок подібні режимам роботи ІТП на початковому етапі плавки, що дозволяє використовувати загальний математичний апарат для опису теплофізичних і електромагнітних процесів в завантаженні цих пристроїв зі зміщенням акценту від інтегральних параметрів індуктора до більш докладного розгляду поля в завантаженні [3]. При цьому необхідно мати уявлення про процеси, що відбуваються в завантаженні, розташованій в різних зонах установки, і, по можливості, управляти цими процесами. При нагріванні заготовки важливо забезпечити рівномірність розподілу температур по перетину, що складно реалізувати при нагріванні в пульсуючому полі. Елементи складової заготовки знаходяться в полі рівної напруженості і відповідно мають однакову потужність тепловідлення, але тепловіддача від периферійних елементів вище, що і призводить до зазначеної нерівномірності температурного поля.

Застосування в даному випадку обертового або біжучого поля може вирішити зазначену проблему.

Другу групу складають пристрої, в яких здійснюється як термічний так і електромеханічний вплив на металевий розплав. Сюди в першу чергу слід віднести магнітогідродинамічні насоси, призначені для перекачування рідкого металу в технологіях лиття заготовок [4]. Вони повинні переважно відповідати заданим вимогам по витрата-напірним характеристикам, а також за умовами роботи, перш за все з точки зору нагріву обмотки індуктора. Також сюди можна віднести різні перемішувачі, задіяні в технологіях отримання сплавів і перемішувачі металів у процесі кристалізації [5]. До цієї ж групи пристроїв відносяться ІТП з рідкометалічним завантаженням [6] і плавильні агрегати на їх основі. Електромагнітні процеси в рідкому металі, що заповнює тигель на етапі розплавлення і перегріву, істотно відрізняються від процесів з кусковим завантаженням. На цьому етапі індуктор здійснює і термічне, і силовий вплив на метал. У цьому випадку ІТП дозволяє вирішувати спеціальні металургійні завдання – управління фізико-хімічними процесами на кордоні між шлаком і металом або ж вводяться в метал легувальні або збагачуючі речовини, між металом та матеріалом футеровки, між речовинами різної щільності і різних фізико-хімічних властивостей [4–7].

Як видно, ІТП на різних стадіях роботи об'єднує обидві групи розглянутих індукційних пристроїв. Сучасний підхід до розгляду ІТП як багатофункціонального плавильного агрегату передбачає використання останнього для різних технологічних завдань, а саме – не тільки для розплавлення шихти, але і для перемішування металу перед розливанням, тобто виконання функцій міксерів. Плавка металу в ІТП, крім розплавлення кускової шихти, передбачає ще й управління фізико-хімічними процесами між металом і шлаком, взаємодією між металом і футеруванням тигля і іншими процесами.

ІТП може мати як один індуктор, що поєднує кілька функцій, так і кілька індукторів, що виконують різні функції. При поєднанні функцій електротермічного і електромеханічного впливу на розплав індуктор виконується багатосекційним, що дозволяє створити в робочому просторі печі біжуче уздовж осі індуктора магнітне поле. При застосуванні різних схем живлення секцій індуктора можна отримати різне співвідношення біжучої і пульсуючої складових електромагнітного поля в тиглі. Для здійснення спеціальних технологічних процесів в ІТП часто потрібно створити крім біжуче уздовж осі, яке обертається навколо осі тигля, електромагнітне поле. Індуктор обертача може розташовуватися як під днищем печі так і навколо бічної поверхні тигля. При розташуванні обертача під днищем печі змінюється співвідношення розмірів тигля щодо класичної конструкції печі в бік зменшення співвідношення висоти і діаметра тигля, що може вплинути на енергетичну ефективність «гріючого» бічного індуктора. У ряді випадків індуктор обертача може розміщуватися навколо бічної поверхні у верхній частині тигля або нижньої його частини [7].

Розроблені конструкції «електромагнітних циклонів», індуктори яких набираються з декількох лінійних індукторів з біжучим полем або з декількох індукторів з обертовим полем, струми яких зміщені в тимчасовій і просторовій областях на певний кут для створення обертів і бігу складових поля відповідно. Наведений огляд конструкцій ІТП охоплює лише конструкції з тиглем циліндричної форми. У ряді випадків тигель виконується з листового металу плоским або квадратним в перерізі. Конструктивно така ІТП наближається до циклону, але має лише 2 або 4 індуктора відповідно з незалежним живленням [5]. При такій конструкції можна проводити нагрів і перемішування металу як в поздовжньому так і в поперечному полі, створюваному індукторами.

3. Мета дослідження. Визначення та дослідження електромагнітних параметрів індукційної плавильної установки місткістю 4,5 т для виплавки залізо-вуглецевого сплаву.

4. Виклад основного матеріалу. В роботі проводилися дослідження електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі місткістю 4,5 т для виплавки вуглецевої сталі 35Л. Середньовуглецева лита сталь 35Л без термообробки зазвичай має ферито-перлітну структуру з відманштеттовим (орієнтованим) розподілом фериту і наявністю феритної сітки по межах колишніх аустенітних зерен. Застосування високотемпературної нормалізації або нормалізації з подальшим поліпшенням дозволяє значно подрібнити ферит, ліквідувати його орієнтованість, зменшити загальну неоднорідність структури [8]. Найбільш активною сталлю 35Л використовується в машинобудуванні і будівництві. Саме тут повною мірою затребувані її основні властивості: твердість; податливість до обробки. Основна сфера застосування – це виробництво виливків станин для прокатних станів, зубчастих коліс, бігунків і тяг, засувок і балансирів, діафрагм, катків, валків, кронштейнів, інших деталей, що приводяться в дію середніми статичними і динамічними навантаженнями; виливків деталей газових, парових, гідравлічних турбін, осьових компресорів, що працюють при граничних температурах від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$; виливків деталей 1 і 3 груп для трубопровідної арматури, приводних пристроїв з граничною температурою робочого середовища в діапазоні $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$ без обмеження робочого тиску; виливків деталей для гірничо-металургійного обладнання; виливків 3 групи для авіабудування по виплавлених моделях – герметичних корпусів приладів, високонавантажених кронштейнів, стабілізаторів, рам гіроскопів і II групи-фланців, колекторів, негерметичних корпусів приладів, сполучних деталей та ін.

В вісесиметричній постановці однорідний металевий циліндр поміщений в кільцевий провідник, по якому протікає індукційний струм. Осьовий розмір циліндра дорівнює осьовому розміру індуктора. Напруженість магнітного поля спрямована уздовж осі циліндра; за умови нескінченної протяжності системи (відсутні крайові зони, в яких форма силових ліній магнітного поля змінюється) і при осьовій симетрії

(вісь металевого циліндра збігається з віссю кільцевого індуктора) напруженість поля всередині циліндра залежить тільки від координати R . Це ж відноситься і до напруженості електричного поля [9]. Магнітний потік проходить по самій шихті, тому для роботи печі мають велике значення магнітні властивості, а також розміри і форма шматків шихти. Величини індукції, напруженості магнітного поля і вихрового струму, наведеного в шматках шихти, будуть відрізнятися від величин, визначених за допомогою вищеприписаного методу. Між шматками шихти на початковій стадії плавки немає суцільного контакту, контактний опір між шматками шихти набагато більше внутрішнього опору самого шматка, крім того, між шматками існують повітряні проміжки, створюють додаткові шляхи для магнітного потоку, тому картина розподілу напруженості магнітного поля буде наближатися до картини напруженості в порожньому індукторі. Протягом плавки ця картина буде постійно змінюватися зі зміною властивостей шматків шихти, а, отже, буде змінюватися і внутрішній опір завантаження печі, що призводить до постійної зміни режиму роботи печі протягом плавки при інших рівних умовах (незмінна величина і частота струму індуктора) [6].

Коли в якості шихти застосовують феромагнітні метали, то до того моменту, поки їх температура ще не досягла точки Кюрі, тобто $740\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $770\text{ }^{\circ}\text{C}$, їх магнітна проникність зберігає свою величину. В цьому випадку шихта буде грати роль не тільки вторинної обмотки і навантаження, але і незамкнутого сердечника. Інакше кажучи, при плавці в печі без сердечника феромагнітних металів розігрів шихти в перший період (до точки Кюрі) відбудеться не тільки за рахунок тепла, що виділяється від циркуляції в ній вихрових струмів, а й за рахунок втрат на перемагнічування, яке в цей період спостерігається в шихті. Після точки Кюрі феромагнітні тіла втрачають свої магнітні властивості, і робота індукційної печі стає аналогічною роботі повітряного трансформатора, тобто трансформатора без сердечника. Розрахунок параметрів індуктора при нагріванні кускової шихти заснований на складанні схеми заміщення індуктора з кусковим завантаженням (в загальному випадку феромагнітної) за методом, викладеним в роботі [6]. Зміни стосуються розрахунку опору завантаження і заміни параметрів розплаву на параметри шихти.

Кускова шихта в першому наближенні може бути представлена у вигляді сукупності еквівалентних циліндрів, розташованих вертикально в тиглі, причому діаметр циліндрів чисельно дорівнює характерному розміру середнього шматка шихти $d_{\text{ш}}$, а висота їх дорівнює розрахунковій висоті завантаження h_2 . Передбачається, що електричний контакт між окремими еквівалентними циліндрами відсутній.

Процес плавки кускового завантаження в індукційній тигельній печі (ІТП) без залишкової ємності можна розбити на кілька етапів, під час яких властивості шматків шихти змінюються в значній мірі, що безумовно відбивається на інтегральних

параметрах ІТП, зокрема, на активному і реактивному опорах навантажувального контуру:

- нагрівання шматків шихти від початкової температури до температури зміни магнітних властивостей (точки Кюрі);
- нагрівання шматків від точки Кюрі до температури плавлення;
- розплавлення дрібної кускової шихти до утворення рідкого шару з плаваючими в ньому твердими шматками шихти;
- перехід в рідку фазу всього обсягу металу в тиглі;
- досипка холодного металу в тигель до номінальної маси завантаження печі і доведення температури в печі до температури розливання.

У початковий момент часу завантаження печі являє собою сукупність відокремлених один від одного (в електричному відношенні) шматків металу. Перехідний електричний опір контакту між окремими шматками багато більше внутрішнього електричного опору самого шматка. Слід зазначити, що під внутрішнім опором шматка розуміється електричний опір індукційно підведеному струму певної частоти з урахуванням поверхневого ефекту [6].

Найчастіше в ІТП, що працюють з кусковим завантаженням, розмір шматка незрівнянно малий в порівнянні з внутрішнім діаметром тигля, отже, розглядаючи завантаження цілком, в межах одного шматка шихти величину магнітного потоку можна вважати незмінною. Структура кусковий завантаження ІТП є неупорядкованою, шихта являє собою різномірний набір геометричних тіл (відрізки металевих профілів, скручена дрот, спресована стружка), що має лише регламентований розмір «середнього діаметра шматка шихти», який є визначальним при виборі частоти, на якій працює піч або рекомендований для застосування на даній частоті. При моделюванні завантаження ми змушені від неупорядкованої структури перейти до впорядкованої, замінивши шматок неправильної геометричної форми шматком, який можна надалі легко описати математично.

Усереднений шматок шихти вважається ізотропним, тобто має одні і ті ж властивості незалежно від обраного напрямку. Ці характеристики усередненого шматка шихти відповідає металева куля. Завантаження ІТП рідко являє собою набір об'єктів з правильною геометричною формою, яку слід було б враховувати при моделюванні, тому для опису усередненого шматка, скористаємося об'єктом, в якому при падінні плоскої хвилі справедливий рівняння, записані для циліндра. Для спрощення опису електромагнітних процесів можна використовувати осьову симетрію печі, коли магнітні потоки проходять лише в осьовому і радіальному напрямках, а також відомий підхід заміни шихтового завантаження набором довгих циліндрів, розташованих всередині тигля в осьовому напрямку [9]. Усереднений шматок шихти при цьому можна представити у вигляді умовного об'єкта, що володіє ізотропією властивостей тільки в двох напрямках-нормальному (напрямку, перпендикулярному осі

тиглю) і тангенціальному (відповідно, по осі тигля). Циліндр, що має ту ж масу, щільність, питомий електричний опір, що і усереднений шматок шихти. Вісь цього розрахункового циліндра при розрахунках завжди збігається з напрямком магнітного потоку, для якого проводиться обчислення магнітного опору шматка.

Складова магнітного потоку Φ_{τ} , яка спрямована паралельно осі тигля; складова магнітного потоку Φ_n спрямована відповідно радіусу. Якщо скористатися вищеописаним допущенням, електромагнітні процеси в окремому шматку шихти можна описати за відомою методикою [9–10].

В результаті проведених операцій отримаємо модель печі з кусковим завантаженням при початковій температурі. В процесі плавки температура в різних зонах печі різна; розплавлений метал накопичується в нижній частині тигля печі, тоді як у верхній – залишається відносно холодним. Отримана модель не має принципових обмежень на зміну властивостей як по верствам, так і по ділянках робочої області. Такі величини як питомий електричний опір або магнітна проникність можна задати вручну або автоматично як по тій, так і по іншій координаті, ввівши додатково в модель відповідні матриці розподілу по шарах і ділянках того чи іншого параметра. Також в моделі можна задати частину завантаження, представлену у вигляді неспекшихся шматків шихти, а іншу частину ("болото") – як розплавлений метал, моделюючи тим самим весь процес плавки в індукційній тигельній печі.

Для вищеописаної моделі користувалися допущенням, що опір контакту між окремими шматками великий, і струм, наведений в кільці шихти, зневажливо малий. Однак, при сплаві окремих шматків, опір контакту між шматками значно падає і вплив струму кільця на картину розподілу магнітного поля по перетину вторинного елемента стає переважаючим [10].

Для опису нової моделі введемо наступну термінологію:

- циліндр-магнітопровід-металевий циліндр, що імітує окремий шматок завантаження, орієнтований підставою перпендикулярно потоку, що пронизує циліндр;
- циліндр-електропровід-металевий циліндр, що імітує окремий шматок завантаження, орієнтований підставою перпендикулярно електричному струму, що проходить через циліндр.

Відповідно до виділених вище режимів роботи печі розглянемо наступні етапи зміни структури і властивостей завантаження.

- Магнітна холодна шихта представлена елементарними циліндрами-магнітопроводами, що мають розміри шматків шихти і проводять магнітні потоки в кожному n-м кільці виділеного x-го шару в радіальному і осьовому напрямках. Магнітний опір кільця цим потокам визначається як паралельне з'єднання магнітних опорів циліндрів в кільці. Циліндри-електропроводи, суміщені з циліндрами-магнітопроводами, орієнтовані при цьому в

кільцевому напрямку. В цілому вони створюють кільцевий електропровід, опір якого складається з паралельно включених внутрішніх опорів циліндрів, а також послідовно включених (уздовж кільця) внутрішній опір циліндрів і стількох же опорів контакту між цими циліндрами.

- При немагнітної холодної шихті структура завантаження залишається такою ж, тобто включення магнітних і електричних опорів циліндрів не змінюється, але змінюється магнітна проникність матеріалу циліндрів.

- У міру нагрівання завантаження змінюється питома електропровідність гарячої шихти, але її структура і схема заміщення також не змінюються.

- Циліндри-електропроводи гарячої шихти з'єднуються між собою малим контактним опором, утворюючи кільцевий електропровід x -го шару з опором. Структура циліндрів-магнітопроводів залишається колишньою.

- Метал завантаження перетворюється в однорідний розплав. Розрахунок електромагнітних процесів зводиться до дослідження електромагнітного поля в провідному циліндрі, діаметр якого дорівнює внутрішньому діаметру тигля.

Активна потужність печі є частиною загальної потужності, що підводиться до агрегату і виділяється безпосередньо в садку. Вона залежить від необхідної продуктивності, часу нагріву і тепломісткості металу при температурі розливання. Плавка сталі проводиться без рафінування, режим роботи-на твердій завалці. Час плавки дорівнює 1,5 год з урахуванням тривалості розливання і завантаження 10 хв. Шихта складається з сталевого брухту, діаметр шматків шихти від 0,03 до 0,07 м, приймаємо для подальших розрахунків середній діаметр шматків шихти $d_{ш} = 0,05$ м. Корисна потужність ІТП визначається за виразом [6]:

$$P_{пол} = qG / (3,6t_{пл}), \text{ Вт}, \quad (1)$$

де q – теплотемпостність розплавленого металу або сплаву при температурі розливання, Дж/кг; G – смність печі, т; $t_{пл}$ – час плавки, год.

Якщо відома ентальпія c_p металу або сплаву при температурі розливання, то корисна потужність ІТП визначається за виразом [6]

$$P_{пол} = c_p G / t_{пл}, \text{ кВт}. \quad (2)$$

Для подальших розрахунків приймаємо $P_{пол} = 1200$ кВт, теплові втрати $\Delta P_m = 82,5$ кВт (6,875 % від корисної потужності). Сумарні теплові втрати становлять 5–35 % корисної потужності печі, причому менша цифра відноситься до печей більшої смності. Термічний ККД (η_m) індукційної тигельної печі зазвичай становить 75–95 % і визначається за виразом:

$$\eta_m = P_{пол} / (P_{пол} + \Delta P_m). \quad (3)$$

Після визначення орієнтовної потужності пічної установки і вибору частоти струму проводиться підбір джерела живлення.

В роботі проведений розрахунок і вибір робочої частоти джерела живлення ІТП і ефективність плавки

кускової шихти різного розміру. Для вибору частоти і потужності джерела живлення і для наступних розрахунків прийmemo варіант, при якому забезпечуються мінімально прийнятні умови нагріву, з урахуванням розміру кускової шихти $d_{ш} = 0,03 - 0,07$ м отримана залежність частоти від розмірів кускової шихти, яка представлена на рис. 1.

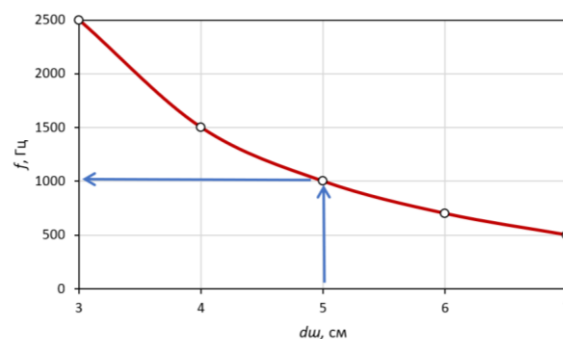


Рис. 1 – Залежність робочої частоти генератора від розмірів кускової шихти

Порівнюючи ефективність і якісні показники ливарних індукційних установок, необхідно представляти яка з них найкращим чином підходить для лиття сплаву, що володіє певними фізико-хімічними властивостями і лінійними розмірами. В теорії індукційного нагріву існує поняття «мінімально допустимої робочої частоти генератора» для заданого діаметра циліндричної заготовки, що підлягає нагріванню.

З наведеного графіка видно, що:

- мінімально допустимий розмір кускової шихти $d_{ш}$ сталі 35Л при роботі індукційної установки з частотою 2500 Гц дорівнює 3 см.

- мінімально допустимий розмір кускової шихти $d_{ш}$ сталі при роботі індукційної установки з частотою 500 Гц дорівнює 7 см.

Тобто, при роботі на ливарній установці з частотою 500 Гц обмежується можливість використання в якості «вторинного металу» елементів ливарної системи, що мають менші розміри. У разі ж їх використання вони будуть нагріватися не під дією індукційних струмів, а внаслідок передачі їм теплової енергії від більш гарячих частин завантаження тигля, що мають більший розмір. Це сприятиме збільшенню часу плавки, тобто погіршення одного з основних параметрів.

Графік на рис. 1 показує, що для нагріву кускової шихти розміром порядку 5 см, необхідна частота генератора не менше 1000 Гц. Якщо ж використовується кускова шихта розміром 4 см, то мінімально допустима частота генератора зростає до 1500 Гц.

Таким чином, вибір робочої частоти генератора для індукційної ливарної установки є найважливішим фактором, що визначає її якісні показники.

Для забезпечення ефективного нагріву шихти і плавки за короткий проміжок часу, приймаючи середнє значення розміру кускової шихти $d_{ш} = 0,05$ м, згідно отриманої залежності (рис. 1) вибираємо частоту $f=1000$ Гц.

В основі розрахунку електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі покладені закономірності поглинання електромагнітних хвиль в металі [6]. Активна потужність, що виділяється в металі, визначена за виразом:

$$P_M = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega)^2 D_2 a_2 \sqrt{\rho_M \mu_M f} \cdot k_{M,P} k_{mp}^2, \text{ кВт} \quad (4)$$

де $k_{M,P}$ – поправочний коефіцієнт активної потужності, що враховує кривизну бічної поверхні садки нагрівається матеріалу і залежить від відносини середнього діаметра тигля і глибини проникнення струму в ньому; k_{mp} – повний коефіцієнт магнітного розсіювання:

$$k_{mp} = k'_{mp} + \Delta k_{mp}, \quad (5)$$

де k'_{mp} – коефіцієнт магнітного розсіювання. Значення цього коефіцієнта визначається за даними [1] як функція співвідношень. Приймаємо $k'_{mp} = 0,9563$.

$$\Delta k_{mp} = \frac{3}{4} \left(1 / \left(\frac{D_2}{\Delta_3} - 1 \right) \right), \quad (6)$$

Настил струму $(I\omega) = H_u$ знаходимо з виразу, в якому відомі всі величини

$$I\omega = \frac{400}{k_{mp}} \sqrt{\frac{P_M}{D_2 a_2 \sqrt{\rho_M \mu_M f} \cdot k_{MP}}}, \quad (7)$$

де P_M – потужність, що виділяється в металі, кВт.

На рис. 2 показана отримана залежність настилу струму від частоти. Активна потужність, що втрачається в індукторі, становить:

$$P_{II} = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega)^2 D_1 a_1 \sqrt{\rho_{II} f} \cdot k_{II,P} \frac{1}{k_3}, \text{ кВт}, \quad (8)$$

де $k_{II,P}$ – поправочний коефіцієнт активної потужності, що враховує кривизну індуктора; k_3 – коефіцієнт заповнення індуктора $k_3 = 0,7 \dots 0,9$.

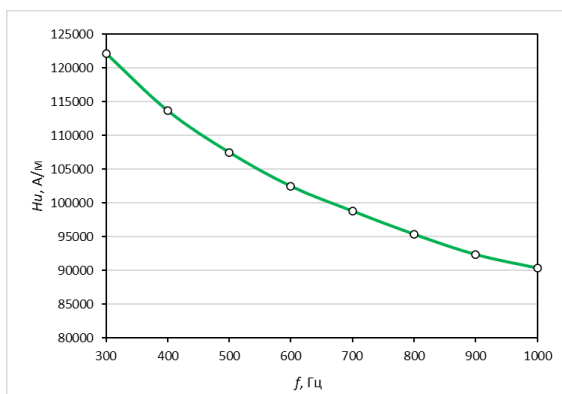


Рис. 2 – Залежність настилу струму від частоти

Реактивна потужність, що виникає в металі, дорівнює, кВт·А,

$$Q_M = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega)^2 D_2 a_2 \sqrt{\rho_M \mu_M f} \cdot k_{M,Q} k_{mp}^2, \quad (9)$$

де $k_{M,Q}$ – поправочний коефіцієнт реактивної потужності, що враховує кривизну індуктора.

Реактивна потужність, що виникає в зазорі між індуктором і тиглем, становить, кВт·А,

$$Q_3 = 6,2 \cdot 10^{-9} (I\omega)^2 f \cdot D_2^2 a_2 \left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 - 1 \right], \quad (10)$$

Реактивна потужність, що виникає в індукторі, дорівнює, кВт·А,

$$Q_{II} = 6,2 \cdot 10^{-6} (I\omega)^2 D_1 a_1 \sqrt{\rho_{II} f} \cdot k_{II,Q} \frac{1}{k_3}, \quad (11)$$

Підставивши отримане значення настилу струму в індукторі визначаємо значення активних і реактивних потужностей P_w , Q_w , Q_3 , Q_{II} , а також сумарну активну $P_{u.n.}$, кВт, реактивну $Q_{u.n.}$, кВт·А, і повну потужність S , споживану установкою. Визначаємо загальні активну, реактивну і повну потужність системи «індуктор-метал» та величину струму в індукторі:

$$I = \frac{S \cdot 10^3}{U_{II}} \text{ А}$$

На рис. 3 представлені отримані залежності повної потужності S системи «індуктор-метал» і сили струму I в індукторі від частоти струму f .

Проведений розрахунок електричних параметрів системи індуктор-завантаження. Визначивши електричні параметри системи індуктор-завантаження, більш точно розрахований електричний ККД індуктора та число витків індуктора. Встановлену кількість витків індуктора розміщують рівномірно по його висоті. Зазор між витками заповнюють електричною ізоляцією, товщину якої приймають з розрахунку 10-40 В на 1 мм товщини ізоляції. Мінімальна товщина ізоляції не повинна бути менше 1,5 - 2,0 мм.

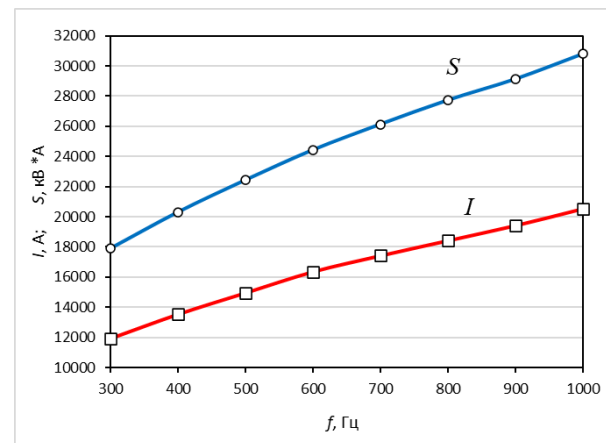


Рис. 3 – Залежність повної потужності системи «індуктор-метал» і сили струму в індукторі від частоти струму

Залежність розмірів кускової шихти, що завантажується в піч для виплавки сталі, і число витків індуктора N від частоти f , показана на рис. 4.

В індукційних нагрівальних установках реактивна потужність досить велика, а, отже, $\cos \varphi$ дуже низький. Тому в установках такого типу для компенсації реактивної передбачають включення в електричну піч батареї конденсаторів, ємність якої вибирають з умов резонансу ланцюга піч-конденсатори з частотою струму живлення.

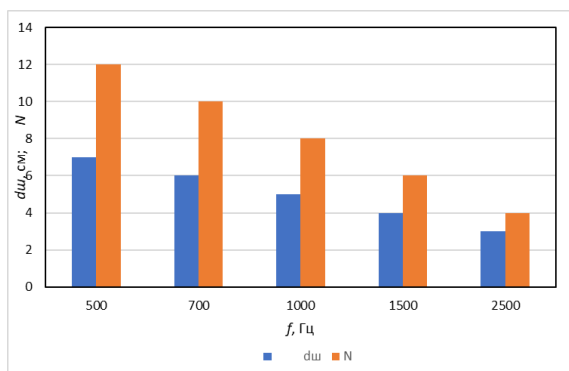


Рис. 4 – Гістограма розмірів кускової шихти d_u і числа витків індуктора N від частоти f

Батарей складають з конденсаторних банок, частина з яких постійно підключена до індуктора, а частина включена через комутуючі пристрої – ці банки підключаються в міру необхідності для підстроювання коливального контуру в резонанс при зміні параметрів завантаження під час нагрівання [6].

Визначимо необхідну кількість конденсаторних банок, а також електричних втрат в конденсаторах. Реактивна потужність конденсаторної батареї (з урахуванням недовикористання банок по напрузі), необхідна для компенсації $\cos\varphi$ установки до $\cos\varphi_u$ (при живленні від ТПЧ $\cos\varphi_u \approx 0,6$), визначається за виразом:

$$Q_{к.б.} = P_n (tg\varphi - tg\varphi_k) \frac{U_{б.н.}^2}{U_u^2} k_{\delta}, \text{ вар}, \quad (12)$$

де P_n – потужність, що підводиться до індуктора, Вт; k_{δ} – загальний коефіцієнт запасу (1,1–1,3); $tg\varphi$ – «природний» коефіцієнт реактивної потужності; $tg\varphi_k$ – коефіцієнт потужності, відповідний $\cos\varphi_k$ скомпенсованого коливального контуру; $U_{б.н.}$ – номінальна напруга конденсаторних банок, В; U_u – напруга на індукторі, В. До розрахунку приймаємо $U_{к.б.} = 1000$ В.

Ємність конденсаторної батареї визначаємо за виразом

$$C_{к.б.} = \frac{Q_{к.б.}}{2\pi f U_u^2}, \Phi. \quad (13)$$

При застосуванні додаткового виведення на індукторі для можливості підвищення напруги з метою підтримати потужність печі при зміні параметрів металу в процесі плавки, щоб напруга на індукторі не перевершувало номінальної напруги конденсаторів, можливо два варіанти:

а) використовувати напругу перетворювача 750 В, а конденсатори на 1500 В;

б) вибрати напругу перетворювача 1500 в, конденсатори на 1000 В, з'єднані попарно послідовно.

Для досліджуваної установки вибираємо другий варіант з напругою на індукторі $U_u = 1000$ В, конденсаторами типу ЕСВ на 500 або 1000 В з соволовою ізоляцією, з'єднаних попарно послідовно. Перетворювач частоти в перший період приєднується до крайніх витків індуктора, а після втрати магнітних

властивостей – до такого числа витків, при якому напруга на полюсах індуктора не перевищить 1500 В.

Після зміни параметрів шихти і втрати магнітних властивостей перетворювач підключається до витків індуктора, напруга на індукторі дорівнюватиме 1500 В, а струм, що протікає по ньому, складе 11961 А. Для такого підключення число витків складе 11 витків індуктора. Встановлене кількість витків індуктора розміщуємо рівномірно по його висоті. Зазор між витками заповнюють електричною ізоляцією, товщину якої приймають з розрахунку 10–40 В на 1 мм товщини ізоляції. Мінімальна товщина ізоляції не повинна бути менше 1,5–2,0 мм. Тоді ізоляційний проміжок між витками, задавши напругу на 1 мм зазору 20 в/мм, складе 5 мм. Таким чином, визначені основні характеристики індукційної тигельної печі, що отримані за результатами розрахунків.

Висновки. У роботі виконані розрахунки і дослідження електромагнітних параметрів індукційної тигельної печі місткістю 4,5 т при виплавці залізо-вуглецевого сплаву, а саме: проведений аналіз електромагнітного впливу на розплавлення металу і розрахунки параметрів ІТП; визначені основні геометричні розміри ІТП, параметри системи індуктор-завантаження; визначені основні електромагнітні параметри печі, такі як потужність, необхідна мінімальна робоча частота джерела живлення, опір завантаження індуктора, коефіцієнт корисної дії, число витків індуктора та ін.; отримані залежності настилу струму, повної потужності системи «індуктор-метал» і сили струму в індукторі від частоти струму; розглянуті принципи дії, циркуляція залізо-вуглецевого сплаву в ІТП, представлена математична модель параметрів печі з кусковим завантаженням шихти при початковій температурі, яка враховує електромагнітний вплив, що викликає наведення вихрових струмів в металі, розігрівуючих і розплавляючих метал; частоту струму мережі живлення, фізичні властивості розплавленого металу, неоднорідність властивостей металу, кусковий характер завантаження печі в початковий період плавки вуглецевої сталі 35Л.

В роботі встановлена залежність розмірів кускової шихти і числа витків індуктора від частоти струму; отримана залежність робочої частоти генератора для індукційної ливарної установки від розмірів кускової шихти сталі 35Л, що є найважливішим фактором, який визначає якісні показники індукційної тигельної печі та забезпечує ефективний нагрів шихти і плавки за короткий проміжок часу.

Список літератури:

1. Долгополов А. Е. и др. Концепция создания современного литейного предприятия // Информация как двигатель научного прогресса. – 2018. – С. 115-119.
2. Sundus M.A., Akimov O., Kostyk K. Development of an iron-based alloy with a high degree of shape recovery // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2017. – № 3/12 (87). – С. 30–37.
3. Simeiko K. V., Pliencko B. K., Sidorenko M. A. Electrothermal fluidized bed technique using for realization of high-temperature

- technological processes // *Energy technologies & resource saving*. – 2019. – № 1. – С. 35-44.
4. Швецов Л. В. История и перспективы развития литейного производства РУП "МоАЗ" // *Литье и металлургия*. – 2019. – № 3. – С. 89-90.
 5. Шибяев Е. В., Кечин В. А. Перспективные технологии плавки и литья при изготовлении фасонных отливок // *Редакционная коллегия*. – 2019. – С. 123.
 6. Булгакова А. и др. Основы получения отливок из сплавов на основе железа. – Litres, 2019.
 7. Idan A., Akimov O. V., Kostyk K. O. Surface hardening of steel parts // *Праці Одеського політехнічного університету : зб. наук. Праць / Одес. політехн. ун-т. Одеса, 2017. – № 1(51). – С. 17–23.*
 8. Костик В. О. Исторические аспекты диаграммы железо-цементит // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2014. – № 1 (3). – С. 17-19.
 9. Фаткуллин С. М., Сарапулов Ф. Н., Идиятулин А. А., Фризен В. Э. Одномерная динамическая модель индукционной тигельной печи // *Электротехника*. – 2010. – №5. – С. 37–42.
 10. Лузгин В. И., Фризен В. Э., Черных И. В. Динамическая модель индукционной тигельной печи // *Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: Вестник УГТУ-УПИ*. – Екатеринбург, 2003. – Ч. 2. – С. 163–166.
- References (transliterated)**
1. Dolgopolov A. E. i dr. *Konczepczija sozdaniya sovremennogo litejnogo predpriyatiya* [The concept of creating a modern foundry enterprise] // *Informacziya kak dvigatel' nauchnogo progressa* [Information as the engine of scientific progress]. – 2018. – P. 115-119.
 2. Sundus M.A., Akimov O., Kostyk K. *Development of an iron-based alloy with a high degree of shape recovery* // *Skhi'dno-Yevropejs'kij zhurnal peredovikh tekhnologi'j* [Eastern European journal of advanced technologies]. – 2017. – 3/12 (87). – P. 30–37.
 3. Simeiko K. V., Pienko B. K., Sidorenko M. A. *Electrothermal fluidized bed technique using for realization of high-temperature technological processes* // *Energy technologies & resource saving*. – 2019. – 1. – P. 35-44.
 4. Shveczov L. B. *Istoriya i perspektivy` razvitiya litejnogo proizvodstva RUP" MoAZ"* [History and prospects of development of the foundry production of RUE "MoAZ"] // *Lit'e i metallurgiya* [Casting and metallurgy]. – 2019. – 3. – P. 89-90.
 5. Shibaev E. V., Kechin V. A. *Perspektivny'e tekhnologii plavki i lit'ya pri izgotovlenii fasonny'kh otlivok* [Promising technologies of melting and casting in the production of shaped castings] // *Redakcionnaya kollegiya* [Editorial board]. – 2019. – P. 123..
 6. Bulgakova A. i dr. *Osnovy` polucheniya otlivok iz splavov na osnove zheleza* [Fundamentals of obtaining castings from iron-based alloys]. – Litres, 2019.
 7. Idan A., Akimov O. V., Kostyk K. O. *Surface hardening of steel parts* // *Praczi` Odes'kogo poli'tekhnichnogo uni'versitetu : zb. nauk. Praczi`* [Proceedings of the Odessa Polytechnic University: collection of Sciences. Labours'] / *Odes. politekhn. un-t. Odessa, 2017. – № 1(51). – С. 17–23.*
 8. Kostik V. O. *Istoricheskie aspekty` diagrammy` zhelezo-czementit* [Historical aspects of the iron-cementite diagram] // *Tekhnologicheskij audit i rezervy` proizvodstva* [Technological audit and production reserves]. – 2014. – 1 (3). – P. 17-19.
 9. Fatkullin S. M., Sarapulov F. N., Idiyatulin A. A., Frizen V. E'. *Odnomernaya dinamicheskaya model' indukcionnoj tigel'noj pechi* [One-dimensional dynamic model of an induction crucible furnace] // *E'lektrotekhnika* [Electrical Engineering]. – 2010. – 5. – P. 37–42.
 10. Luzgin V. I., Frizen V. E`., Cherny`kh I. V. *Dinamicheskaya model' indukcionnoj tigel'noj pechi* [Dynamic model of an induction crucible furnace] // *E'lektromekhanicheskie i e'lektromagnitny'e preobrazovateli e'nergii i upravlyaemy'e e'lektromekhanicheskie sistemy`*. *Vestnik UGTU-UPI* [Electromechanical and electromagnetic energy converters and controlled Electromechanical systems: Bulletin of UGTU-UPI]. – Ekaterinburg, 2003. – Ch. 2. – P. 163–166.

Поступила (received) 15.06.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костик Катерина Олександрівна (Костик Екатерина Александровна, Kostyk Kateryna Oleksandrivna) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ливарного виробництва НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: +38-068-40-25-037; e-mail: Kateryna.Kostyk@khipi.edu.ua, ORCID: 0000-0003-4139-9970

Акімов Олег Вікторович (Акимов Олег Викторович, Akimov Oleg Viktorovich) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри ливарного виробництва НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: +38-057-707-6-320; e-mail: Oleg.Akimov@khipi.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7583-9976

Острроверхова Ксенія Віталіївна (Острроверхова Ксения Витальевна, Ostroverkhova Kseniia Vitaliivna) – магістр кафедри ливарного виробництва НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: +38-057-707-6-854; e-mail: ksusha.kitrum@gmail.com