

УДК 621.365

С.І. Випанасенко, д-р техн. наук

(Україна, Дніпропетровськ, Національний гірничий університет)

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЯ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ СТАЛЬНОГО ДРОТУ

У метизному виробництві існує можливість термічної обробки тонкого сталюого дроту індукційним методом нагріву [1]. Особливість індукційних установок такого призначення полягає у формуванні подовжнього магнітного поля, що діє в суцільному циліндричному провіднику з феромагнітними властивостями. Така форма поля характерна для більшості відомих конструктивних рішень індукторів, що використовуються в технології нагріву дроту. Відомі конструкції індукторів орієнтовані на нагріву дроту, що рухається з достатньо високою швидкістю, і забезпечують його термообробку шляхом індукційної передачі енергії. На відміну від широко розповсюджених систем нагріву циліндричних заготовок, які орієнтовані на термообробку деталей порівняно великого діаметра, що в більшості випадків знаходяться у нерухомому стані, системи нагріву дроту експлуатуються в дещо інших температурних режимах. Їх слід урахувати при аналізі електромагнітних та теплових процесів і виборі на цій основі раціональних параметрів режиму.

У роботі розглянуті особливості експлуатаційних режимів нагріву дроту і визначена раціональна частота струму індукційної установки.

Розглянемо параметри нагріву, які впливають на вибір частоти струму індуктора. Насамперед звернемо увагу на тривалість нагріву дроту. Час нагріву повинен бути невеликим (від десятих часток секунди до одиниць секунд). Це визначено умовою експлуатації технологічної лінії. Висока продуктивність установки може бути забезпечена при значній швидкості руху дроту. З іншого боку, довжина індукційної установки обмежена. Її активна частина (зона впливу на дріт електромагнітного поля) повинна бути невеликою. Це впливає із загальних вимог до установки – у першу чергу, до її компактності. Прийнятним варіантом, виходячи з експлуатаційних вимог, можна вважати довжину установки від 0,5 до 1,5 м. Висока швидкість нагріву дроту може бути досягнута раціональним розташуванням джерел тепла, що діють усередині дроту. Розташування джерел повинно сприяти збільшенню швидкості процесу. Ця проблема безпосередньо пов'язана з вибором частоти струму індуктора.

Важливою вимогою до нагріву дроту є забезпечення високої енергоефективності нагріву. Цей показник в існуючих системах термообробки дроту є порівняно низьким, що, власне, і стало причиною пошуку альтернативних методів нагріву (зокрема, індукційного методу). Зрозуміло, що, акцентуючи увагу на індукційному нагріві дроту, необхідно подбати про те, щоб режим нагріву був

енергоефективним. У всякому разі його енергоефективність повинна перевершувати енергоефективність відомих технологій нагріву.

При індукційному нагріві основним показником, що характеризує енергетичну ефективність процесу, є його ККД. Тому при виборі частоти струму необхідно забезпечити прийнятний рівень цього важливого параметра. Можливо, що ККД буде розглядатися як основний параметр при аналізі різних показників, які впливають на вибір частоти струму індукційної установки. Оцінка ККД установки передбачає визначення окремих складових втрат енергії. Із цієї позиції важливо зрозуміти, які втрати варто розглядати, які рівні цих втрат, якою мірою вони залежать від частоти струму. Передбачається, що установка буде мати феритовий магнітопровід. У певному діапазоні частот ферити мають невеликі втрати на гістерезис. Однак при значному збільшенні частоти струму ці втрати можуть виявитися вагомими, що спричинить зниження ККД установки, і, як наслідок, виникнуть проблеми з охолодженням магнітопроводу.

При виборі частоти струму варто врахувати характер зміни електричних і магнітних параметрів дроту в процесі його нагріву. Слід звернути увагу на межі зміни цих параметрів. Важливою характеристикою магнітних властивостей дроту є його відносна магнітна проникність m . Відомо, що в діапазоні температур, обмеженому точкою Кюрі, значення m змінюється незначно. При перевищенні цього значення температури проникність різко падає, що супроводжується істотним зменшенням ККД нагріву. Якщо досягнутий рівень ККД нагріву є надзвичайно важливим показником (а саме такий підхід пропонується використовувати при оцінюванні ефективності індукційного нагріву дроту), то температурні режими, що перевищують значення точки Кюрі, доцільно виключити, тобто нагрів здійснювати до $t < 700$ °С. Зрозуміло, що в цих режимах зміна m несуттєва, і можна вважати, що $m = const$.

У процесі нагріву дроту змінюється також його питомий опір r . Цей параметр значною мірою залежить від температури дроту. У процесі його руху значення температури змінюється від початкового рівня t_n до кінцевого t_k , отриманого на виході установки. Не вникаючи в деталі щодо характеру зміни температури вздовж індуктора (цей факт при з'ясуванні питання вибору частоти струму не настільки істотний), можна визначити граничні значення температур t_n й t_k . Виходячи із вищесказаного, t_n є температурою навколишнього середовища (20–40 °С), а t_k має верхню межу 700 °С. Таким чином, стає визначеним діапазон зміни температури дроту, що є важливою інформацією при виборі частоти струму індуктора.

Вибір частоти струму значною мірою пов'язаний із впливом на навколишнє середовище, у першу чергу, на здоров'я обслуговуючого персоналу. Характер такого впливу визначається як рівнем напруженості електромагнітного поля, так і його частотою. Збільшення частоти негативно впливає на стан людини. При цьому допустимі норми напруженостей поля знижуються. У технології індукційного нагріву дроту особиста участь обслуговуючого персоналу у технологічному процесі при працюючій установці не передбачається. Однак тимчасове перебування людини в електромагнітному полі не виключається. У зв'язку

з цим, ситуація багато в чому подібна діючій в близьких за своїм характером технологіях індукційного нагріву. Мова йде про технології плавки металів, технології наскрізного й поверхневого нагріву. Завдання забезпечення безпеки робіт у цих технологіях вирішені. Цей досвід може бути повною мірою використаний при реалізації індукційного нагріву дроту.

Виконаний раніше аналіз особливостей режимів роботи системи індукційного нагріву дроту дозволив виділити характерні риси запропонованої технології нагріву, а також параметри, що значною мірою визначають умови вибору частоти струму. Ці дослідження варто зв'язати з відомими з літературних джерел підходами до вибору частоти струму в інших технологіях індукційного нагріву. Така паралель дозволить більш глибоко вникнути в суть питання, порівняти існуючі підходи із ситуацією, що виникла, й на цій основі запропонувати наукове обґрунтування вибору частоти струму.

Повні дослідження систем індукційного нагріву виконані в роботах А.Е. Слухоцького, А.Н. Шамова, В.С. Немкова та інших радянських вчених [2, 3]. Разом з глибоким теоретичним аналізом процесів, що протікають у системах, у роботах вчених спостерігається прагнення визначити ефективні режими роботи установок, що важливо для вирішення практичних завдань. Саме із цього погляду істотна увага приділена вибору частоти струму індуктора. Так, в роботі [4] пропонується підхід, що враховує різні ККД системи. Вибір частоти струму здійснюється з урахуванням отримання максимального ККД і мінімальної вартості установки. ККД установки визначається з урахуванням втрат в індукторі, конденсаторній батареї, перетворювачі частоти та струмопроводі. Повний ККД індуктора $h_{інд}$ є добутком теплового ККД h_m і електричного ККД системи індуктор-деталь h_e . Збільшення частоти струму сприяє зростанню h_e й зниженню h_m . Останнє пояснюється тим, що зі збільшенням частоти струму зменшується глибина проникнення електромагнітної хвилі Δ в матеріал і зростає час нагріву, тобто зростають теплові втрати. На рис.1 наведені залежності $h_{інд}$, h_e і h_m від відношення діаметра циліндричної деталі D до параметра Δ [4].

Як видно із графіка, найбільші значення ККД досягаються при $D/\Delta = 2,5 - 6$.

Враховуючи те, що значення Δ залежить від частоти струму [2], то для кожного діаметра заготовки D існує діапазон прийнятних з точки зору енергоефективності процесу нагріву значень частоти струму f . Так, для деталей з діаметрами $D = 1,5 - 15$ см раціональний діапазон частот струму складає 50–8000 Гц. Застосування середніх частот струму передбачає наявність перетворювача частоти. Тому зрозуміло, що вартість установки збільшується зі зростанням частоти струму. Із аналізу випливає, що при виборі частоти струму виходять із прийнятного діапазону зміни відношення D/Δ . Цей принцип пропонується використовувати при виборі значення f для технології нагріву дроту.

Звернемо увагу на той факт, що нагрів дроту повинен здійснюватися за короткий проміжок часу (виходячи з високої швидкості руху). Отже, доцільно орієнтуватися на прогрів внутрішніх шарів дроту з досить високим значенням Δ .

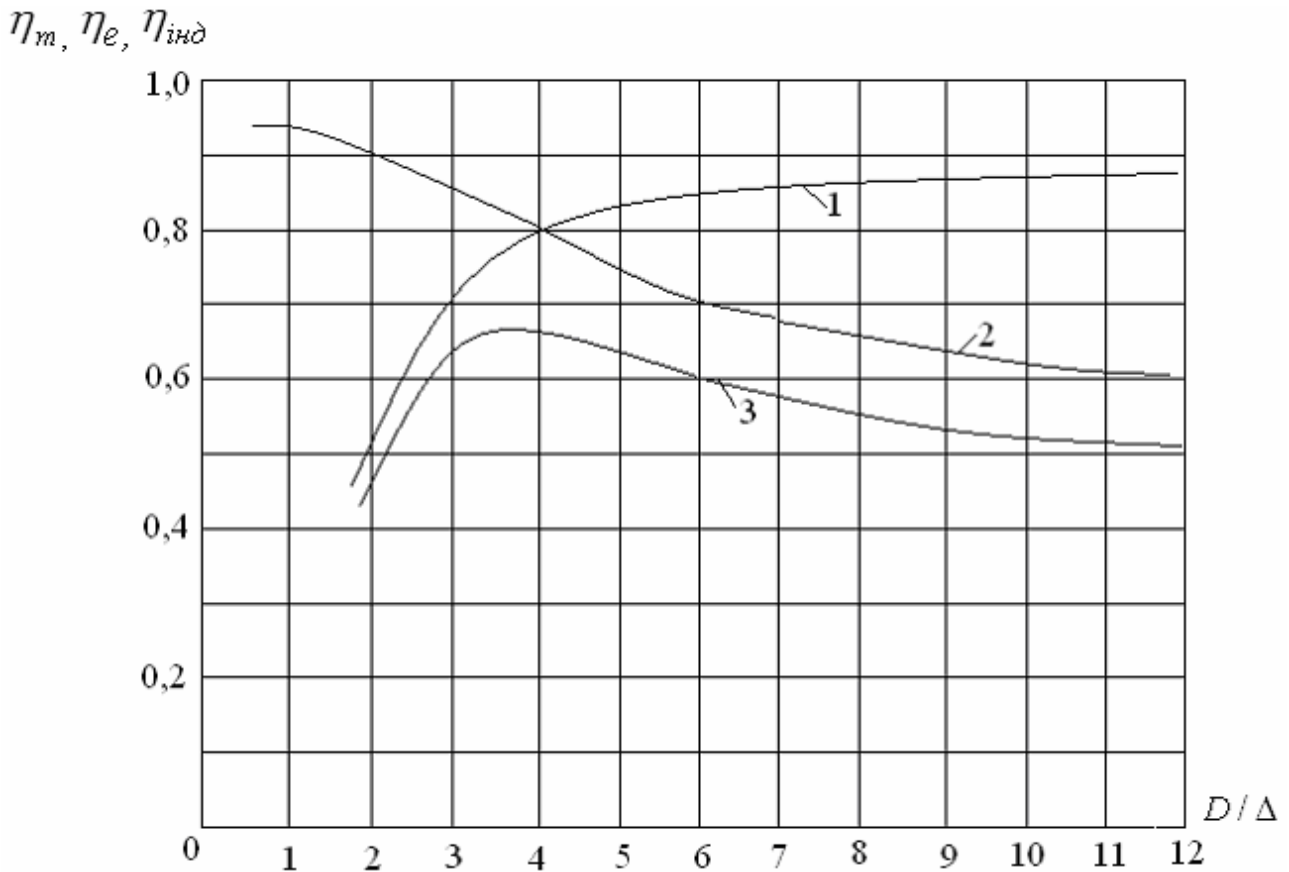


Рис.1. Залежність електричного (1), теплового (2) і повного (3) ККД індуктора від відношення D/Δ

Якщо реалізувати поверхневий нагрів, то процес прогріву дроту буде затягнутим, що не є прийнятним з існуючих обмежень нагріву у часі. Поверхневий нагрів, пов'язаний з істотним підвищенням температури поверхні, також не є прийнятний, оскільки граничне значення температури обмежене значенням точки Кюрі. Її перевищення призведе до зниження ККД нагріву. Якщо нагріти поверхневий шар з погляду на (після виходу із зони дії магнітного поля) вирівнювання температури всередині дроту за рахунок теплопровідності матеріалу, то очевидно, що в такому варіанті температура нагріву дроту (після вирівнювання) буде невисокою. Виключення поверхневого нагріву з розгляду обмежує верхню межу прийнятних для нагріву частот струму. Розглянемо залежність Δ від f . Згідно з роботою [2]

$$\Delta = 503 \sqrt{\frac{r}{mf}}, \quad (1)$$

де r – питомий електричний опір матеріалу, що нагрівається; m – відносна магнітна проникність цього матеріалу.

Якщо врахувати залежність $m(H)$, де H – напруженість магнітного поля, то отримаємо

$$\Delta = 352 \sqrt{\frac{r}{m_e f}}, \quad (2)$$

де m_e – відносна магнітна проникність матеріалу на поверхні дроту.

При $H > 10^5$ А/м (що відповідає очікуваним режимам нагріву дроту) $m_e \approx 16$. Питомий електричний опір сталевого дроту залежить від його температури t і змінюється в межах $r_1 = 18,9 \cdot 10^{-8}$ Ом·м ($t = 20^\circ \text{C}$) до $r_2 = 77 \cdot 10^{-8}$ Ом·м ($t = 700^\circ \text{C}$), що також повинно бути враховано при виборі частоти струму f . Для верхньої межі виділеного діапазону зміни відношення D/Δ ($D/\Delta = 6$) нахил функції $h_{\text{інд}}(D/\Delta)$ малий (рис.1), а це свідчить про те, що ККД в результаті незначної зміни Δ буде змінюватись у невеликих межах. Цього не можна стверджувати про нижню межу ($D/\Delta = 2,5$). Тут нахил функції $h_{\text{інд}}(D/\Delta)$ значний і порушення цього режиму може у більшій мірі вплинути на рівень ККД. Саме тому при виборі частоти струму варто орієнтуватися на забезпечення нижньої межі відношення D/Δ . Що саме буде сприяти зменшенню D/Δ ? Аналізуючи наведені вище залежності, можна дійти до висновку, що відношення D/Δ зменшується при збільшенні питомого опору r в процесі нагріву. Щоб виключити можливість зменшення відношення D/Δ нижче рівня 2,5, необхідно забезпечити значення нижньої межі цього відношення при найбільшому питомому опорі r_2 , що відповідає максимальній температурі нагріву, а саме:

$$2,5 = D / 352 \sqrt{\frac{r_2}{m_e f_H}}, \quad (3)$$

де f_H – нижня межа частоти струму індуктора.

Звернемося до аналізу верхньої межі зміни відношення D/Δ . Умова $D/\Delta \leq 6$ не буде порушуватись у будь-яких режимах роботи установки в тому випадку, коли умові $D/\Delta = 6$ буде відповідати мінімальне значення питомого опору r_1 . Тоді верхню межу частоти струму отримаємо з рівняння

$$6 = D / 352 \sqrt{\frac{r_1}{m_e f_6}}. \quad (4)$$

На рис.2 наведені залежності $f_H(R)$, $f_6(R)$, де R – радіус дроту.

Заштрихована на рис. 2 поверхня дозволяє визначити прийнятні частоти струму індуктора $f_H \leq f \leq f_6$ для заданого значення радіуса сталевого дроту, що нагрівається. Отже, при зміні температурних меж нагріву залежності (рис.2) також підлягають коригуванню.

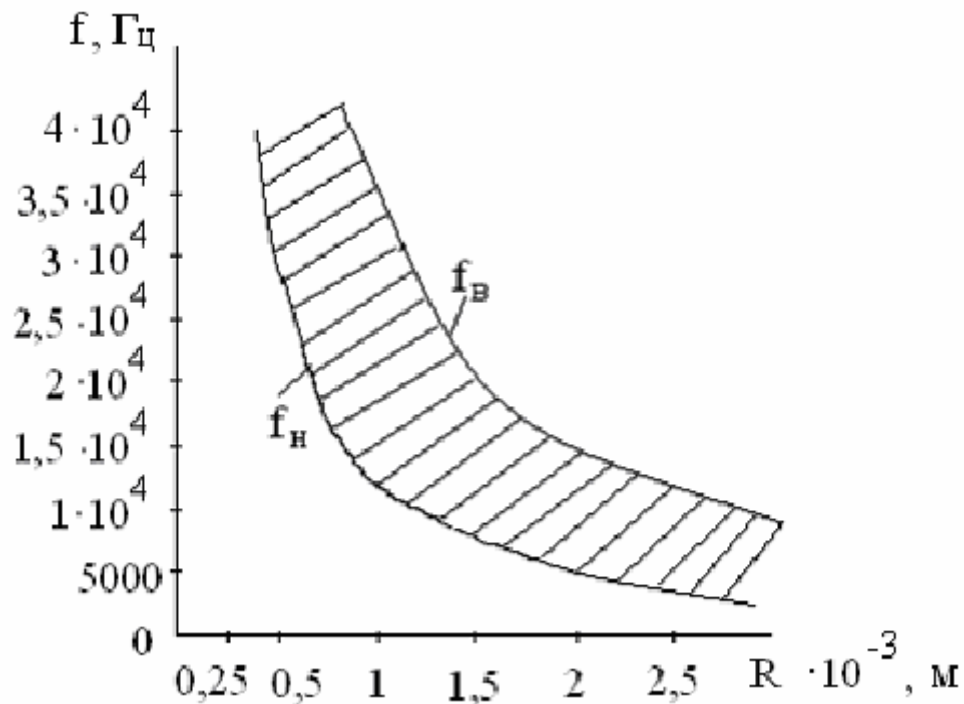


Рис. 2. Залежності $f_n(R)$ та $f_v(R)$

Звернемо увагу на той факт, що зменшення діаметра дроту веде до різкого збільшення частоти струму індуктора. Починаючи з діаметра, що перевищує 1 мм, нагрівання можна здійснити в області підвищених частот (до 40 кГц), що може бути реалізовано за допомогою пристроїв силової напівпровідникової перетворювальної техніки. Нагрів дроту з меншим діаметром (відповідно до наведеної методики вибору частоти струму) вимагає застосування лампових генераторів, що забезпечують генерування струмів високих частот.

Слід зазначити, що за наявності альтернативних рішень у виборі джерела живлення варто орієнтуватися на використання устаткування з більш низькою вихідною частотою. Це зумовлено тим, що в пристроях силової електроніки зниження вихідної частоти струму супроводжується збільшенням ККД джерела, а також істотним зменшенням його вартості. Таким чином, при виборі устаткування варто орієнтуватися на нижню межу частот, що відповідає значенню f_n .

Висновки

1. Особливості технології нагріву дроту малого діаметра полягають в тому:
 - висока швидкість нагріву;
 - нагрів здійснюється у повздовжньому магнітному полі;
 - у різних зонах впливу магнітного поля індукційної установки питомі опори дроту відрізняються, що пов'язано із зміною його температури в процесі нагріву.
2. При виборі частоти струму індуктора в технології нагріву тонкого дроту запропоновано в першу чергу орієнтуватися на забезпечення високої енергетичної ефективності процесу.

3. Отримані аналітичні залежності, що дозволяють розрахувати верхню і нижню межі діапазону частот струму індуктора. Врахований характер зміни електричних властивостей дроту в процесі нагріву. Залежності дозволяють вибрати прийнятне для користувача значення частоти струму у визначеному діапазоні.

Список літератури

1. Фомин Н.И., Затуловский Л.М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. – М.: Металлургия, 1979. – 247 с.
2. Слухоцкий А.Е. Индукторы / Под ред. А.П. Шамова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1989. – 68 с.
3. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
4. Кувалдин А.Б. Высокочастотный нагрев.: Учебн. пособие для вузов. – М.: Энергетический институт, 1977. – 40 с.