

Дрешпак Н.С. (Національний гірничий університет, Дніпропетровськ)

РЕЖИМИ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ, З'ЄДНАНИХ ПОСАДКОЮ З НАТЯГОМ

Обґрунтовано значення частоти струму індукційної установки для демонтажу циліндричних деталей, з'єднаних посадкою з натягом. Визначені параметри магнітного поля, що відповідають режиму ліквідації натягу посадки.

Обосновано значение частоты тока индукционной установки для демонтажа цилиндрических деталей, соединенных посадкой с натягом. Определены параметры магнитного поля, отвечающие режиму ликвидации натяга посадки.

Вступ. В машинобудуванні часто застосовують з'єднання циліндричних деталей (втулки і вала) посадкою з натягом. З'єднання прості у виконанні, а нерухомість деталей забезпечується механічними напруженнями, що виникають у матеріалі завдяки деформації контактних поверхонь. При наявності крутильного моменту, прикладеного до втулки, її нерухомість забезпечується значною поверхнею контакту з валом та відносно малою товщиною, тобто втулка виконується тонкостінною. Прикладами таких з'єднань слугують посадки на вал внутрішніх кілець підшипників, а також буртів, бандажів, що фіксують положення одних деталей відносно інших [4].

Часто ремонт механізмів передбачає демонтаж з'єднаних деталей. Для цього використовують знімачі, які забезпечують переміщення втулки по валу завдяки прикладеному осьовому зусиллю. Таке переміщення супроводжується пошкодженням поверхні вала. Виникають подряпини, риси. Після декількох ремонтів вал стає непридатним до експлуатації.

Нагрівання втулки в процесі демонтажу дозволяє уникнути небажаних наслідків. В результаті нагріву втулка розширюється і її знімають з вала без пошкоджень. Інтенсивний нагрів втулки можна забезпечити індукційним методом. При цьому час на виконання операції скорочується, що сприяє підвищенню енергетичної ефективності процесу. Важливо, щоб втулка і вал мали різні температури поверхонь в зоні з'єднання. Це забезпечить ліквідацію натягу посадки і створення зазору, необхідного для безперешкодного знімання втулки з вала. На рис. 1 показана стальна втулка 1, що посаджена на сталевий вал 2 з натягом. На поверхні втулки розташована обмотка індуктора 3, виконана у вигляді соленоїда. Таке розташування обмотки сприяє активному нагріванню втулки і створенню необхідної різниці температур Δt_T в зоні з'єднаних поверхонь.

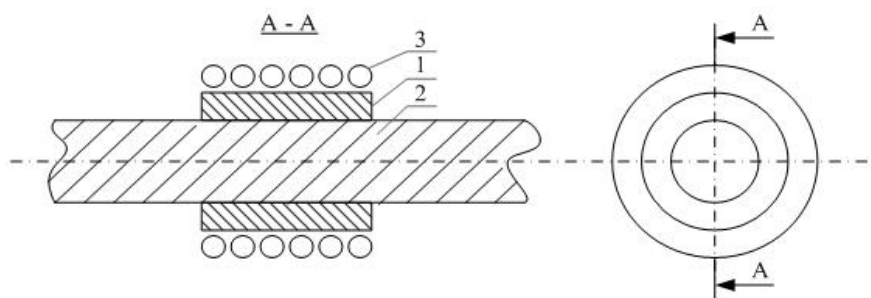


Рис. 1

Пов'язані між собою електромагнітні, теплові процеси, процеси температурного деформування втулки, що супроводжують демонтаж з'єднання індукційним методом, достатньо не досліджені. Проведені раніше дослідження [3,5,6] стосувалися інших умов індукційного нагріву циліндричних деталей, що не пов'язувалися з особливостями контакту поверхні втулки з валом, необхідністю ліквідації натягу посадки.

Відсутність методики розрахунку параметрів індукційного нагріву, що забезпечують демонтаж з'єднаних деталей, призвело до невизначеності параметрів індуктора та джерела живлення. Їх вибір не мав наукового підґрунтя, що на практиці призводило або до надмірного завищення потужності, або до спроб застосувати малопотужні джерела живлення, які не могли забезпечити демонтаж.

Завдання полягало у визначенні режиму індукційного нагріву, що гарантує виконання операції демонтажу при мінімальній потужності джерела живлення. В роботах [2,7] показано, що для виконання цих умов доцільно використовувати однорідне магнітне поле, а ліквідація натягу посадки повинна завершуватись у режимі стаціонарного теплового процесу. Шляхом проведення експериментальних досліджень безпосередньо на реальному об'єкті здійснюють вирівнювання параметрів магнітного поля на поверхні втулки та ідентифікують параметри теплопередачі між з'єднаними деталями [2]. Це дозволяє з достатньою для практики точністю визначити значення питомої поверхневої потужності P_0 , яка забезпечує ліквідацію натягу посадки. Створення необхідної картини магнітного поля та обмеження області його дії розмірами втулки дозволило розглядати електромагнітні процеси в системі нагріву як такі, що виникають у поздовжньому магнітному полі, яке діє в суцільному однорідному циліндрі. Це значно спростило аналіз, дозволило застосувати відомий математичний апарат [6], який визначає зв'язок між параметрами магнітного поля на поверхні втулки і електричними та магнітними параметрами матеріалу, що підлягає нагріву. При цьому враховується залежність відносної магнітної проникності матеріалу від напруженості магнітного поля, що підвищує точність розрахунку параметрів режиму.

Мета роботи. Стаття присвячена обґрунтуванню раціонального значення частоти струму індукційного нагріву втулки та визначенню на цій основі параметрів магнітного поля, які забезпечують демонтаж деталей.

Результати досліджень. При виборі частоти струму для нагрівання циліндричних деталей входять із умови забезпечення високої енергетичної ефективності процесу [3,6]. Звертають увагу на той факт, що із збільшенням кривизни циліндричної поверхні її спроможність до поглинання енергії електромагнітного поля знижується. Для оцінки ступеня кривизни поверхні в [3,6] вводиться параметр $m = \sqrt{2} \cdot R_1 / \xi$ (ξ – глибина активного шару дії струму; R_1 – зовнішній радіус втулки). Зменшення інтенсивності поглинання енергії призводить до зниження електричного ККД процесу нагріву. При збільшенні параметра m ситуація покращується, електричний ККД зростає, але в результаті концентрації джерел тепла на поверхні деталі процес нагрівання внутрішніх прошарків затримується і час нагрівання деталі збільшується. Це призводить до збільшення втрат енергії з поверхні деталі, що супроводжується зменшенням термічного ККД. У результаті цього загальний ККД зменшується [3]. Виходячи з вищевикладеного, слід орієнтуватися на реалізацію енергоефективних режимів, що відповідають умові $2,5 < m < 6$ [3]. Проте встановлені в [3] межі зміни параметра m можуть бути не прийнятними для процесів демонтажу з'єднань. Це зумовлено тим, що додатковим обмеженням глибини проникнення електромагнітної хвилі при нагріванні з'єднання деталей є товщина втулки. Проникнення хвилі у вал призведе до його нагрівання і зменшення різниці температур Δt_T , необхідної для роз'єднання деталей. Тому повне затухання хвилі повинно відбуватися у втулці. Виходячи із того, що повне затухання хвилі при залежному від напруженості магнітного поля значенні відносної магнітної проникності μ ($\mu = \text{var}$) відбувається на відстані від поверхні втулки $X_n = 1,68\Delta_e$ [6], сформульована умова відповідає нерівності

$$X_n \leq \Delta_e; \quad \Delta_e \leq \frac{\Delta_e}{1,68}, \quad (1)$$

де Δ_e – глибина проникнення струму ($\Delta_e = \xi \cdot f(n)$, для вуглецевих сталей $n=9.4$; $f(n)=1.32$ [6]); Δ_e – товщина втулки.

Через те, що для тонкостінних втулок значення Δ_e/R_1 складає $0.1 \div 0.2$, слід очікувати збільшення параметра m . Дійсно, нижня межа m_n , що відповідає значенню $\Delta_e/R_1=0.2$ та $\Delta_{en} = \Delta_e/1,68$ складає $m_n = 15.6$. Зрозуміло, що умова (1) буде виконуватися при $m \geq m_n$. Викладене свідчить про те, що обмеження глибини проникнення електромагнітної хвилі товщиною втулки призводить до отримання значень m , які дещо перевищують значення рекомендованого для використання в [3] діапазону $2,5 \leq m \leq 6$. Тому доцільно вибирати режим нагріву, якомога ближчий до рекомендованого. Такий режим відповідає граничному значенню $m = m_n$. Для режиму характерне „глибоке” прогрівання втулки по всій її товщині, що дозволяє скоротити час для отримання необхідної різниці температур Δt_T .

Граничному m_n відповідає ефективна глибина проникнення струму

$$\xi_n = \frac{\Delta_{en}}{f(n)} = \frac{\Delta_e}{2,2}. \quad (2)$$

Зосередимося на визначенні граничного значення частоти струму f_n при $m = m_n$. Для цього визначимо амплітуду напруженості магнітного поля на поверхні втулки Hm_{en} , що відповідає значенню f_n . Її можна отримати із залежності [6]

$$1,2P_0 = \frac{1}{2} Hm_{en}^2 \cdot \frac{\rho_t}{\Delta_{en}} f(n) \cdot F(m), \quad (3)$$

де ρ_t – питомий опір матеріалу втулки при температурі t_n на її поверхні, що відповідає режиму ліквідації натягу; $F(m)$ – поправочна функція, що враховує залежність P_0 від форми поверхні, яку нагрівають [3].

В (3) підставляють значення P_0 , що відповідає розрахованому в [3] режиму нагріву, а також відповідні значення Δ_{en} та m_n . Ураховуючи можливу похибку розрахунку P_0 , значення поверхневої потужності в (3) збільшено на 20% ($1,2P_0$). Рівняння розв'язують відносно параметра Hm_{en} . У зв'язку з тим, що розглядаються режими з $m > m_n$, значення $F(m)$ приймаємо приблизно рівними 0,95 [3].

Визначення напруженості магнітного поля Hm_{en} при використанні струму частотою f_n дозволяє розрахувати відповідні значення відносної магнітної проникності сталеної втулки μ_{en} на її поверхні. Для цього слід застосувати залежність [6]

$$\mu_{en} = 5 \cdot 10^5 \cdot (H_{en})^{-0,894}, \quad (4)$$

де H_{en} – діюче значення напруженості магнітного поля на поверхні втулки.

Значення частоти f_n отримуємо із рівняння [6]

$$\Delta_{en} = 503 \sqrt{\rho_t / (\mu_{en} f_n)}. \quad (5)$$

Таким чином визначають значення f_n , що відповідає параметру m_n . На рис. 2 показано залежності $f_n(P_0)$, побудовані для різних значень Δ_e при $\rho_t = 25 \cdot 10^{-8}$ Ом·м (1 – $\Delta_e = 0,005$ м, 2 – $\Delta_e = 0,01$ м, 3 – $\Delta_e = 0,015$ м, 4 – $\Delta_e = 0,02$ м, температура зовнішньої поверхні втулки $t_n = 100^\circ\text{C}$).

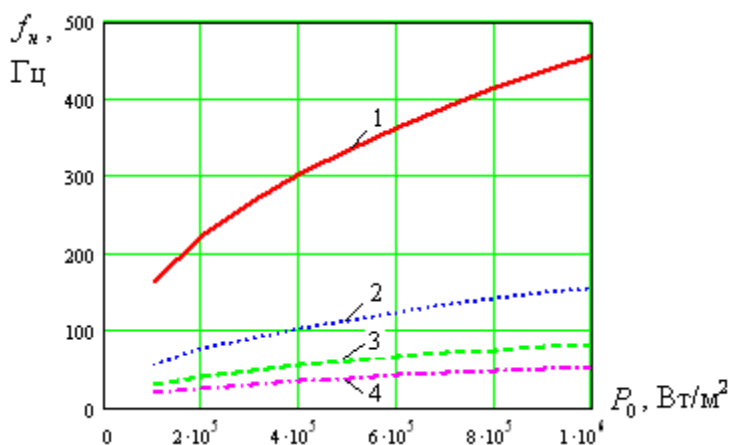


Рис. 2

Таким чином, вихідну частоту джерела живлення слід вибирати мінімальною з урахуванням її стандартних значень та виконанням умови $f_n \leq f_g$. Із рис. 2 видно, що при товщині втулки Δ_e більшій 2 см доцільно здійснювати нагрів на промисловій частоті $f_g = 50$ Гц. При менших значеннях Δ_e частоту f_g слід підвищувати.

Так як зменшення частоти струму джерела живлення призводить до зменшення його вартості, то доцільно вибирати вихідну частоту джерела f_g якомога ближчою до значення f_n . Необхідно також вибирати значення f_g виходячи із нормативних стандартних значень вихідних частот джерел живлення індукційних установок. Наприклад, з урахуванням діючого державного стандарту такими частотами f_g для напівпровідникових перетворювачів частоти є 500, 1000, 2400, 4000, 8000, 10000 Гц. Крім того, для демонтажу з'єднань широко використовується промислова частота $f_g = 50$ Гц.

Визначення вихідної частоти джерела живлення f_g дозволяє розрахувати значення параметрів електромагнітного поля та матеріалу, що відповідають режиму ліквідації натягу H_e , μ_e , m . Для цього скористаємося залежностями, що містять параметри, які необхідно розрахувати. З урахуванням формули для визначення питомої поверхневої потужності [3,6], отримаємо

$$1,2P_0 = 2 \cdot 0,993 \cdot 10^{-3} H_e^2 \sqrt{\rho_t \mu_e f_g} \cdot f(n) \cdot F(m); \quad (6)$$

$$m = \frac{\sqrt{2} R_1 f(n)}{503 \sqrt{\rho_t / (\mu_e \cdot f_g)}}. \quad (7)$$

Аналітичні залежності (4), (6), (7), що встановлюють характер існуючих зв'язків між конструктивними, технологічними параметрами об'єкта та параметрами електромагнітного поля, дозволяють створити математичну модель, орієнтовану на визначення параметрів поля, що відповідають ліквідації натягу посадки. Характер цих залежностей показує, що для розрахунку значень H_e , μ_e , m , які відповідають питомій поверхневій потужності $1,2P_0$ та встановленому значенню частоти f_g , необхідно розв'язувати систему нелінійних алгебраїчних рівнянь відносно змінних H_e , μ_e .

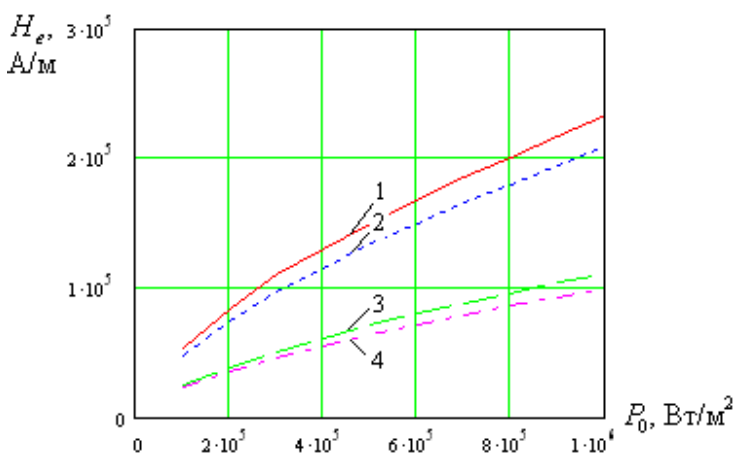


Рис. 3

На рис. 3 та рис. 4 показано залежності $H_e(P_0)$ та $\mu_e(P_0)$, розраховані для різних значень частоти струму індуктора f_g і питомого опору ρ_t (1 – $f_g=50$ Гц, $\rho_t=25 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; 2 – $f_g=50$ Гц, $\rho_t=35 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; 3 – $f_g=500$ Гц, $\rho_t=25 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; 4 – $f_g=500$ Гц; $\rho_t=35 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

Прийняті при розрахунку питомі опори відповідають очікуваному температурному режиму ліквідації натягу. Вони можуть бути отримані, виходячи з відомих значень Δt_T [1] і залежності ρ_t від температури, наведеної, наприклад, в [3].

Із рис. 3 видно, що однакові значення питомої поверхневої потужності P_0 на

різних частотах f_g реалізуються при різних значеннях напруженості магнітного поля. Більшому значенню частоти відповідає менше значення напруженості.

Зрозуміло, що більше значення напруженості поля потребує збільшення струму, який протікає в індукторі. Це призводить до збільшення габаритних розмірів обмотки індуктора, а також маси матеріалу (міді), який використовується в обмотці. При необхідності покращення цих показників доцільно підвищувати частоту струму. Прийнятним є діапазон частот, що вимірюється одиницями кГц. Джерела живлення з такими вихідними частотами мають достатньо високий ККД (біля 0,9) [1] і можуть бути реалізовані з використанням напівпровідникових приладів порівняно низької вартості (наприклад, одноопераційних тиристорів). Із рис. 3, 4 видно, що параметри H_e , μ_e в незначній мірі залежать від ρ_t .

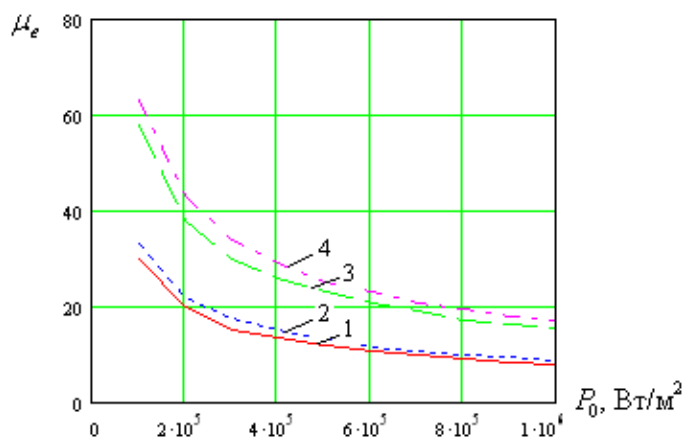


Рис. 4

Тому при визначенні цих параметрів можливе використання середнього значен-

ня $\rho_t = 25 \cdot 10^{-8}$ Ом·м ($t_n = 100^\circ\text{C}$), характерного для виконання технологічної операції. Залежності $H_e(P_0)$, $\mu_e(P_0)$ для частот f_g в одиниці кГц ($\rho_t = 25 \cdot 10^{-8}$ Ом·м) показано на рис. 5 (1 – $f_g=500$ Гц; 2 – $f_g=1000$ Гц; 3 – $f_g=2400$ Гц; 4 – $f_g= 8000$ Гц; 5 – $f_g=10000$ Гц).

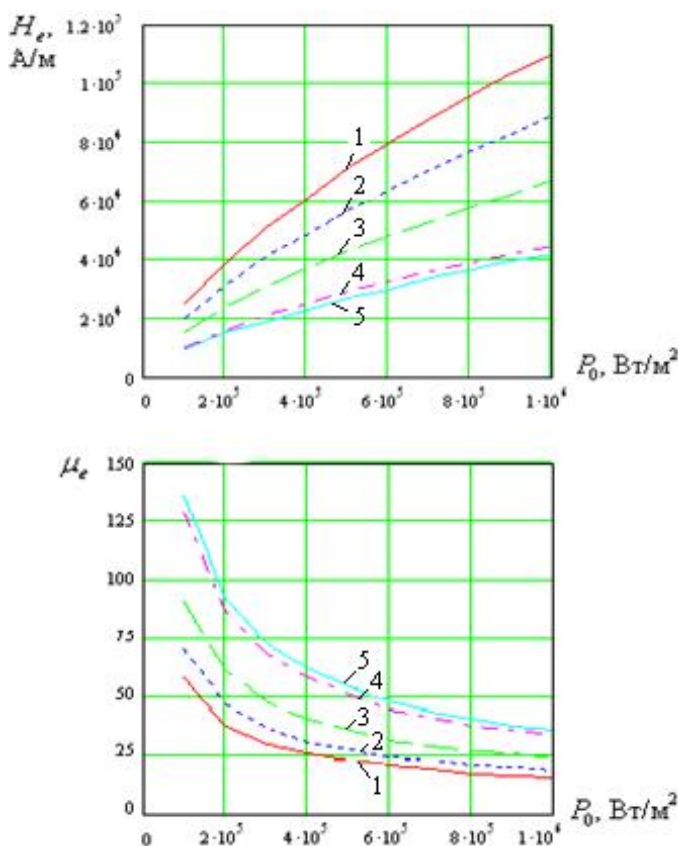


Рис. 5

Результати розрахунку на моделі значень параметрів характеризуються досить високою точністю, тому що базуються на використанні аналітичних залежностей із загальноприйнятими допущеннями. Розрахунок з використанням цих залежностей забезпечує похибку, що не перевищує декількох одиниць відсотків [6].

Залежності, показані на рис. 3,4,5, мають важливі для практики демонтажу з'єднань значення, тому що встановлюють зв'язок між розрахунковим рівнем P_0 [2] і значеннями H_e , μ_e . Визначення параметрів P_0 , f_g , H_e , μ_e створює основу для розрахунку індуктора, вибору потужності джерела живлення і рівня напруги живлення. При цьому можна користуватися відомими методами розрахунку, викладеними, наприклад, в [3,6].

Висновки. При виборі частоти струму індукційної установки запропоновано виходити з умови високої енергетичної ефективності процесу нагріву, обмеження проникнення електромагнітного поля у вал з'єднаних деталей та урахування стандартних значень вихідної частоти джерела живлення. Встановлено значення нижньої межі цього параметра. При товщині втулки, більшій 2 см, доцільно здійснювати нагрів на промисловій частоті 50 Гц. При менших значеннях товщини, а також при масогабаритних обмеженнях конструкції індуктора, доцільне використання підвищених частот (одиниці кГц).

Визначення параметрів P_0 , f_g , H_e , μ_e створює основу для розрахунку індуктора та вибору потужності джерела живлення, що забезпечує ліквідацію натягу посадки і демонтаж з'єднання циліндричних деталей.

Визначення параметрів P_0 , f_g , H_e , μ_e створює основу для розрахунку індуктора та вибору потужності джерела живлення, що забезпечує ліквідацію натягу посадки і демонтаж з'єднання циліндричних деталей.

1. Беркович Е.И., Ивенский Г.В., Йоффе Ю.С., Матчак А.Т., Моргунов В.В. Тиристорные преобразователи высокой частоты. – Л.: Энергия, 1973. – 200 с.

2. Витанасенко Н.С. Определение удельной поверхностной мощности индукционного нагрева соединенных деталей, выполненных посадкой с натягом // Вісник Приазовського держ. техн. ун-ту. – 2008. – Вип. № 18. – Ч.2. – С. 131–136.

3. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.

4. Мягков В.Д. Допуски и посадки. – М.: Машиностроение. 1966. – 550 с.

5. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

6. Слухоцкий А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А., Бамуэр А.В. Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов / Под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоатомиздат, 1981. – 328 с.

7. Dreshpak N, Induction Heating Requirements for Cylindrical Connections Dismantling // Збірник наукових праць ХНАДУ «Студентство. Наука. Іноземна мова». – 2009. – Рр. 318–321.

Надійшла 02.07.2009