

Н.С. Дрешняк*(Україна, Дніпропетровськ, Національний гірничий університет)*

МЕТОДИКА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОДНОРІДНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ В ПРОЦЕСІ ДЕМОНТАЖУ З'ЄДНАНЬ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

Постановка питання. Циліндричні з'єднання деталей машин, які розглядаються в статті, широко використовуються в машинобудуванні. Вони складаються із сталевих втулок, які посаджені на сталеві вали посадкою з натягом, без будь-яких додаткових елементів кріплення. Ці конструкції прості у виконанні, а нерухомість деталей досягається завдяки механічним напруженням, що виникають у матеріалах деформованих поверхонь. Посадки втулок на вал часто виконують у вигляді буртів, бандажів, що фіксують положення інших деталей на валу і перешкоджають їх осьовому переміщенню.

У процесі виробництва та при випробовуванні і ремонті машин часто доводиться виконувати демонтаж таких з'єднань. Демонтаж з'єднань здійснюють за рахунок осьових навантажень, що при використанні знімачів супроводжується пошкодженням посадкових поверхонь у вигляді виникаючих поверхневих подряпин. Після декількох ремонтів вал стає непридатним для використання. Значні обсяги демонтажних робіт призводять до суттєвих матеріальних витрат.

Небажаних наслідків можна уникнути завдяки температурному деформуванню з'єднань деталей. У результаті нагрівання втулка розширюється і її знімають з вала без пошкоджень поверхонь. Один із найбільш ефективних методів демонтажу – індукційний нагрів втулки.

Для опису процесу демонтажу циліндричних деталей індукційним методом розглянемо систему «індуктор – з'єднання» (рис.1). Як видно, ця система включає втулку 2, посаджену на вал 1, та обмотку індуктора 3, з'єднану із джерелом живлення. Обмотку індуктора розташовують на зовнішній поверхні втулки. Таке розташування індуктора зумовлене необхідністю швидкого нагріву втулки, що досягається концентрацією магнітного поля в цій області.

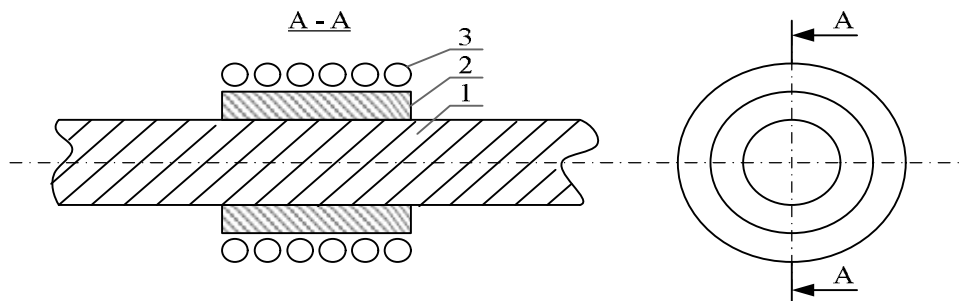


Рис.1. Система «індуктор – з'єднання»

Індукційне нагрівання пов'язане з електромагнітними процесами, що протікають в системі. Характер цих процесів у значній мірі визначає ефектив-

ність демонтажу. Для забезпечення результативної, енергоефективної операції демонтажу слід обрати необхідний режим нагріву. Для цього важливо сформулювати загальні вимоги до процесу нагріву та визначити умови, за яких вони можуть бути виконані.

Щодо вимог, то, перш за все, обраний режим нагріву повинен забезпечувати реалізацію процесу демонтажу, оскільки невдалий режим може призвести до ситуації, коли не всі частини втулки будуть нагріті достатньо для демонтажу і натяг в окремих локальних зонах не буде ліквідовано, тобто демонтаж не буде реалізовано.

Інша важлива вимога до формування режиму нагріву полягає в мінімізації потужності джерела живлення індукційної установки. Ця вимога обумовлена порівняно високою вартістю джерел живлення, створюваних на базі пристроїв силової перетворювальної техніки (перетворювачів частоти). В області малих значень вихідних потужностей (одиниці і десятки кВт) питома вартість (вартість, віднесена до одного кіловата потужності джерела) значна і складає близько \$ 500 за кВт. Саме цей діапазон потужності джерел живлення використовується для демонтажу циліндричних з'єднань деталей. Звідси зрозуміло, що навіть незначне перевищення необхідного значення потужності призводить до істотних витрат. До того ж, потужне джерело живлення, при невдалому режимі нагріву, може призвести до перегріву втулки, що, відповідно, знижує ефективність нагріву з погляду енерговитрат на цю операцію.

Надійність та енергоефективність процесу демонтажу в значній мірі залежить від розподілу джерел тепла на поверхні втулки. Рівномірне розташування джерел тепла сприяє забезпеченню визначених вище вимог до нагріву.

У роботі [1] показано, що рівномірний розподіл джерел тепла на поверхні виробу, що нагрівається, можливий при однорідному магнітному полі, яке створює вихрові струми. Напруженості електричного і магнітного полів у всіх точках циліндричної поверхні однакові. Таке поле реалізується в циліндричних тілах з осью симетрії при нескінченній довжині системи індукційного нагріву [2].

При забезпеченні однорідного магнітного поля в процесі нагріву втулки значення необхідної для демонтажу з'єднань різниці температур Δt між внутрішньою стінкою втулки і поверхнею вала буде однаковою для всіх точок з'єднувальних поверхонь. Це значить, що у момент досягнення значення Δt у всіх точках поверхні з'єднання втулки з валом натяг посадки буде ліквідований.

Таким чином, рівномірний розподіл джерел тепла сприяє одночасному досягненню заданої різниці температур у процесі нагріву в усіх точках поверхні, тобто одночасній ліквідації натягу посадки на всій поверхні з'єднання. При цьому досягається скорочення часу нагріву, зниження необхідної для проведення демонтажу з'єднання потужності джерела енергії і відповідно витрат енергії.

Особливість системи, що розглядається, полягає в наявності крайових ефектів, які не сприяють однорідності електромагнітного поля (рис.2) [3].

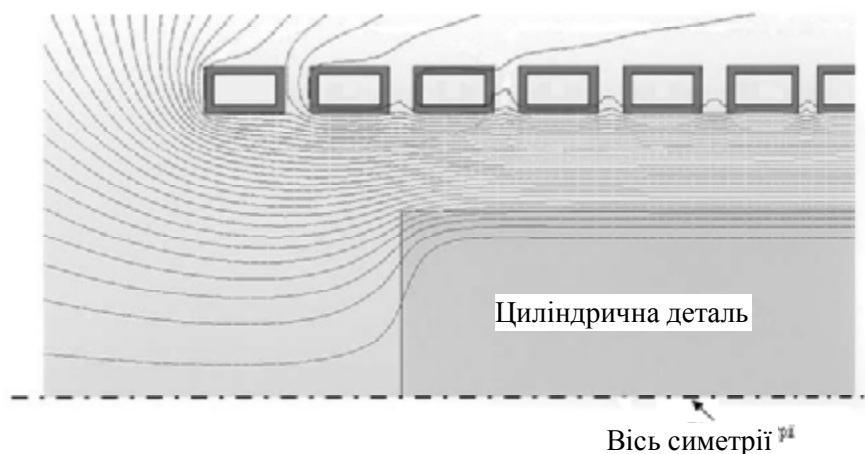


Рис.2. Розподіл магнітного поля, що відображує крайові ефекти

При нагріванні циліндричних провідних тіл, виконаних з феромагнітних матеріалів, максимальне значення напруженості магнітного поля спостерігається в центрі втулки, тому інтенсивність нагріву цієї зони перевищує аналогічні показники біля її торців [1].

Забезпечення однорідності поля можливе завдяки використанню оригінальних конструктивних рішень у системі «індуктор-втулка», які передбачають зміну кроку намотування індуктора. Зниження напруженості поля в центрі циліндра можна досягнути шляхом зменшення кількості витків індуктора, що розташовані над цією зоною.

Отже, завдання дослідження полягає в тому, щоб визначити необхідні показники зміни кроку намотування. Це можливо здійснити шляхом математичного моделювання електромагнітних процесів у системі, що розглядається. Проте складність такого підходу очевидна. Вона зумовлена багатовимірністю вирішуваного завдання, необхідністю урахування специфіки конструктивного виконання обмотки індуктора. У цій ситуації можна вважати виправданим проведення фізичного моделювання електромагнітних процесів і отримання на цій основі однорідного магнітного поля виходячи з конкретних вимірювань напруженості поля на поверхні, що нагрівається. Перевага фізичного моделювання полягає в тому, що дослідження поля передбачається здійснювати на реальному об'єкті. При цьому будуть враховані всі характерні особливості з'єднання деталей. Це забезпечить прийнятну точність результатів і достовірність отриманих висновків.

Таким чином, **мета дослідження** полягає у створенні методики, яка регламентує отримання однорідного поля за допомогою фізичного моделювання, тобто у процесі проведення експерименту.

Основна частина. Сутність експерименту така. Обмотку 1 індуктора, виконану суцільним намотуванням, розташовують на поверхні теплоізоляційної втулки 2 (рис.3). Довжину обмотки 1 індуктора вибирають такою, щоб дорівнювала довжині втулки 3, яка підлягає демонтажу. Втулка 3 посаджена на вал 4. Безпосередньо на поверхню втулки 3 намотують вимірювальну обмотку 5,

виконану тонким ізолюваним проводом. Її намотування також виконується суцільним.

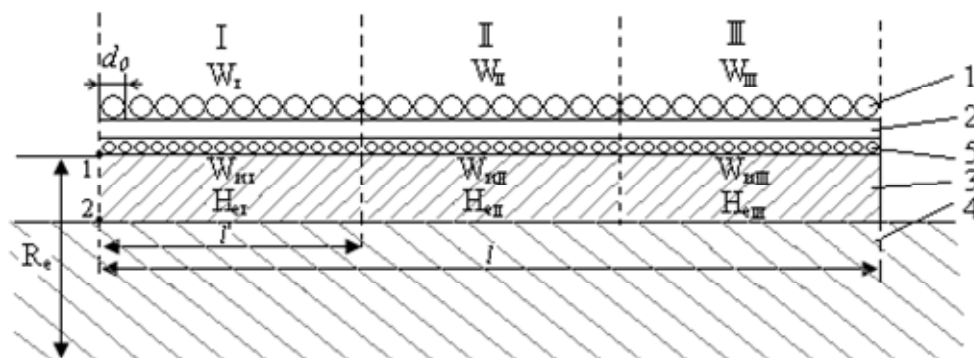


Рис.3. Експериментальні дослідження напруженості магнітного поля на поверхні втулки

Втулку 3, що має довжину l , розбивають на декілька ділянок однакової довжини (наприклад, ділянки I, II, III). Кількість ділянок n доцільно вибирати непарним (3,5,7...) і залежним від довжини l втулки 3. При звичайній довжині втулки число ділянок зростає. Непарна кількість ділянок обумовлена тим, що одна з них повинна знаходитися в зоні максимальної напруженості поля (наприклад, ділянка II). Інші ділянки розташовані в зонах більш низької напруженості магнітного поля (наприклад, I, III). Кількість ділянок і їх довжина l повинні залежати також від діаметра провідника обмотки індуктора d_0 і кількості витків, розташованих на цій ділянці (наприклад, на ділянці I розташовано W_I витків). Бажано, щоб кількість витків на кожній ділянці була більшою або дорівнювала 10 (наприклад, $W_I \geq 10$). У цьому випадку дискретність зміни загальної кількості витків при необхідності їх зменшення складе $1/10$ або менше значення. Це забезпечить високу точність стабілізації напруженості магнітного поля по довжині втулки, що досягається зміною кроку намотування на ділянках, де напруженість перевищує необхідне значення. Діаметр проводу обмотки d_0 повинен вибиратися виходячи із значень струму, що протікає з частотою 50 Гц. Кількість ампер-витків обмотки IW (де W , наприклад, за наявності трьох ділянок $W = W_I + W_{II} + W_{III}$) повинна бути такою, щоб на поверхні втулки забезпечити напруженість магнітного поля $H_e > 4 \cdot 10^4$ А/м. Така напруженість магнітного поля властива сильним магнітним полям, використання яких характерно для систем індукційного нагріву [2]. Наближене значення необхідного струму в обмотці індуктора I може бути знайдене виходячи із закону повного струму ($IW \approx H_e l$). Кількість витків вимірювальної обмотки 5 (W_u) може бути довільною. Важливо, щоб обмотка мала відпаювання на межах виділених ділянок (I, II, III). Тоді відповідно до рис.3 $W_{ui} = W_{uiI} + W_{uiII} + W_{uiIII}$. Відпаювання дозволяють вимірювати рівні напруг, виникаючих на окремих ділянках.

Основу експерименту склав підхід до моделювання процесів, викладений у роботі [2]. Його сутність полягає в безпосередньому вимірюванні напруженості електричного поля E_e на поверхні виробу, що нагрівається. Електрорушійна

сила (ЕРС), що наводиться у витках вимірювальної обмотки, дозволяє визначити напруженість за такою формулою [2]:

$$E_e = e_e / 2pR_e W_u ,$$

де e_e – ЕРС вимірювальної обмотки W_u і R_e – число витків і радіус цієї обмотки.

Враховуючи те, що напруженість електричного поля e_e функціонально пов'язана з напруженістю магнітного поля на поверхні втулки H_e , за значенням e_e можна судити про рівень H_e . Якщо відпаювання вимірювальної обмотки виконати таким чином, що $W_{uI} = W_{uII} = W_{uIII}$ (відповідно до рис.3), то ЕРС, що наводяться на окремих ділянках вимірювальної обмотки (e_{uI} , e_{uII} , e_{uIII}), пропорційні напруженості магнітного поля на цих ділянках (H_{eI} , H_{eII} , H_{eIII}). Нерівність значень ЕРС свідчить про неоднорідність магнітного поля на поверхні втулки. При їх рівності маємо однорідне магнітне поле ($e_{uI} = e_{uII} = e_{uIII}$).

Визначимо послідовність дій при формуванні однорідного магнітного поля. Пропускаючи струм I по обмотці індуктора, вимірюють значення ЕРС e_{uI} , e_{uII} , e_{uIII} на відпаюваннях з рівною кількістю витків W_{uI} , W_{uII} , W_{uIII} . На ділянці, розташованій у центрі втулки (на рис.3 це ділянка II), наведена ЕРС буде максимальною. Вибираємо якнайменше із заміряних значень ЕРС (e_n). Визначаємо розрахункові значення кількості витків на ділянках обмотки індуктора W_{Ip} , W_{IIP} , W_{IIIP} , користуючись формулами:

$$\frac{W_{I}}{W_{Ip}} = \frac{e_{uI}}{e_n} ; \quad \frac{W_{II}}{W_{IIP}} = \frac{e_{uII}}{e_n} ; \quad \frac{W_{III}}{W_{IIIP}} = \frac{e_{uIII}}{e_n} .$$

Ясно, що розрахункові значення кількості витків на окремих ділянках (W_{Ip} , W_{IIP} , W_{IIIP}) будуть меншими, ніж існуючі значення (W_I , W_{II} , W_{III}), або дорівнювати їм (на ділянці або ділянках з мінімальним вимірним значенням ЕРС (e_n)). Наступні дії полягають у тому, щоб шляхом перемотування індуктора змінити кількість витків на окремих ділянках, встановивши розрахункові значення (W_{Ip} , W_{IIP} , W_{IIIP}). Оскільки довжини ділянок залишаються незмінними, то йдеться мова про зміну кроку намотування. При повторному включенні джерела живлення і вимірюванні значення ЕРС (e_{uI} , e_{uII} , e_{uIII}) слід чекати вирівнювання їх рівнів, обумовленого зміною кроку намотування. Якщо вирівнювання значення ЕРС із встановленим ступенем точності не відбулося, то розрахунок рекомендується повторити і провести повторне перемотування. При рівності вимірних ЕРС можна вважати, що однорідність магнітного поля досягнута.

Потім визначають загальну розрахункову кількість витків обмотки індуктора. Для варіанта, наведеного на рис. 3,

$$W_p = W_{Ip} + W_{IIP} + W_{IIIP} .$$

Розраховують відношення W_{Ip}/W_p , W_{IIP}/W_p , W_{IIIP}/W_p . Ці значення відношень кількості витків окремих ділянок до загальної кількості витків обмотки

повинні зберігатися при намотуванні індуктора діючої установки індукційного нагріву поза межами експерименту. На відміну від обмотки в експериментальній установці, розглянутій раніше, обмотка діючої установки може мати іншу загальну кількість витків, яка в значній мірі залежить від значення частоти струму індуктора.

Слід звернути увагу на той факт, що збільшення числа ділянок, на яких вимірюються значення ЕРС, призводить до підвищення точності вирівнювання значення напруженості магнітного поля втулки, підвищення ступеня його однорідності. Ступінь неоднорідності магнітного поля C_n пропонується оцінювати за допомогою вимірювань значень ЕРС на окремих ділянках після перемотування обмотки і встановлення розрахункових значень кількості витків. Для цього використовують такі залежності:

$$C_n = \frac{e_{u.\max} - e_{u.\min}}{e_u} \cdot 100 \% ;$$

$$e_u = e_{uI} + e_{uII} + e_{uIII} + \dots + e_{un},$$

де $e_{u.\max}$, $e_{u.\min}$ – максимальне і мінімальне значення ЕРС, виміряних на окремих ділянках втулки; e_u – ЕРС, наведена у вимірювальній обмотці.

Максимальна ступінь однорідності поля досягається при мінімальному значенні його неоднорідності C_n , що дорівнює нулю. Прийнятною можна вважати ступінь неоднорідності поля, яка не перевищує 5–10%. Така неоднорідність поля не призведе до істотного підвищення необхідної потужності джерела живлення.

Таким чином, створена методика формування однорідного магнітного поля, яка розкриває сутність і послідовність виконуваних дій. Основні позиції розробленої методики такі:

- розподіляють поверхню втулки на ділянки;
- забезпечують суцільне намотування індуктора і вимірювальної обмотки;
- виміряють ЕРС на відпаюваннях вимірювальної обмотки;
- розраховують необхідну кількість витків індуктора для кожної ділянки поверхні втулки;
- здійснюють перемотування індуктора, змінюючи крок намотування на окремих ділянках;
- повторно виміряють ЕРС на відпаюваннях вимірювальної обмотки і оцінюють ступінь однорідності магнітного поля;
- розраховують відношення кількості витків на кожній ділянці поверхні втулки до загальної кількості його витків.

Викладена процедура проведення експерименту свідчить про можливість його реалізації за допомогою простих технічних засобів, про його доступність і простоту. Одержувана інформація відносно ступеня однорідності магнітного поля достовірна, так як отримана на реальному об'єкті в процесі проведення експерименту. Застосування методики для кожного об'єкта демонтажу з'єднання виправдано, оскільки в практиці ремонту машин однотипні операції демон-

тажу здійснюються безліч разів. Тому результати, отримані при проведенні експерименту, використовують при створенні індуктора, орієнтованого на багаторазове застосування.

Висновки

1. Обґрунтовані загальні вимоги до процесу індукційного нагріву. Ліквідацію натягу посадки запропоновано здійснювати при мінімальній потужності джерела живлення, що забезпечить зниження його вартості.

2. Показано, що однією із умов зниження потужності джерела живлення є забезпечення однорідності магнітного поля.

3. Розроблена методика формування однорідного магнітного поля, яка базується на проведенні експериментальних досліджень на реальному об'єкті, визначає зміст та послідовність виконуваних дій.

Список літератури

1. Немков В.С., Казьмин В.Е., Пронин А.М. Исследование краевого эффекта ферромагнитного цилиндра при индукционном нагреве // Электротехника. – 1985. – № 2. – С. 10-12.
2. Немков В.С, Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
3. Rudnev V., Systematic Analysis of Induction Coil Failures, Part 2: Coil End Effect// Heat Treating Progress. – 2006. – May/June. – P.19-20.