

УДК 621.311

Н.С. Дрешпак, канд. техн. наук

Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м. Дніпропетровськ, Україна, e-mail: zev5@yandex.ru

РЕЗУЛЬТАТИ АНАЛІЗУ РЕЖИМІВ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ РОЗНІМНИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

N.S. Dreshpak, Cand. Sci. (Tech.)

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: zev5@yandex.ru

RESULTS OF ANALYSIS OF INDUCTION OF HEATING MODES OF MACHINE PARTS WITH DETACHABLE CONNECTION

Мета. Метою статті є аналіз раціональних режимів індукційного нагріву рознімних з'єднань деталей машин, що забезпечують ефективний демонтаж з'єднань та покращують техніко-економічні показники існуючих установок індукційного нагріву.

Методи. Аналітичний метод розрахунку – для дослідження електромагнітних процесів в одновимірному полі; метод фізичного моделювання – для вирівнювання напруженості магнітного поля на поверхні втулки та ідентифікації контактної теплової провідності; оцінки достовірності математичного моделювання; числовий метод розрахунку з формуванням кінцево-різницевого рівняння та застосуванням методу прогонки – для дослідження теплового процесу індукційного нагріву; метод інтерполяції – для встановлення залежності контактної теплової провідності від різниці температур контактуючих поверхонь; метод оптимізації – при обґрунтуванні вимог до процесу демонтажу з'єднань та визначенні раціональних режимів.

Результати. Електрична питома поверхнева потужність індукційного нагріву, що забезпечує демонтаж з'єднання деталей, прямо пропорційна ідентифікованому значенню контактної теплової провідності та необхідної для виконання технологічної операції різниці температур між контактними поверхнями втулки та валу.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає у встановленні закономірностей протікання взаємопов'язаних електромагнітних, теплових процесів та процесів температурної деформації, що протікають у системі індукційного нагріву з'єднання деталей машин.

Практична значимість. Виконані теоретичні дослідження склали основу для створення методики розрахунку питомої поверхневої потужності на основі ідентифікованого значення теплової провідності, методики вирівнювання напруженості поля на поверхні втулки та пристрою, що здійснює таке вирівнювання безпосередньо на об'єкті для демонтажу, а також способу управління операцією демонтажу з'єднання деталей, який полягає у зміні частоти слідування імпульсів струму індуктора.

Ключові слова: індукційний нагрів, посадка з натягом, демонтаж з'єднань

Постановка проблеми. Циліндричні з'єднання сталених деталей машин (втулки з валом), виконані посадкою з натягом, широко використовують у машинобудуванні. Посадки втулок на вал часто виконують у вигляді буртів, бандажів, що фіксують положення інших деталей на валу і перешкоджають їх осьовому переміщенню. До з'єднань такого типу відносять також посадки внутрішніх кілець підшипників на вал.

При ремонті машин, їх випробовуванні доводиться виконувати демонтаж з'єднань. Розпресування з'єднань здійснюють за рахунок осьових навантажень, що при використанні знімачів супроводжується пошкодженням насадочних поверхонь у вигляді виникаючих поверхневих подряпин. Після декількох ремонтів вал стає непридатним для використання. Значні обсяги демонтажних робіт призводять до суттєвих матеріальних втрат.

Небажаних наслідків дозволяє уникнути нагрівання з'єднань деталей. У результаті нагрівання втулка розширюється і її знімають з валу без пошкоджень по-

верхонь. Одним із найбільш ефективних методів демонтажу є індукційний нагрів з'єднань деталей. Демонтаж здійснюють з мінімальними витратами часу та енергії, що характерно для систем прямого нагріву.

У той же час, режими нагріву з'єднання, що призводять до ліквідації натягу посадки та виникнення умов, необхідних для демонтажу вузла, не досліджені. Індукційний нагрів з'єднань циліндричних деталей характеризується тим, що поряд з електромагнітними й тепловими процесами в системі протікають процеси температурної деформації, які призводять до розширення втулки. Це суттєво впливає на умови теплообміну втулки з валом і визначає досягнутий рівень температур. Відсутність теоретично обґрунтованих параметрів режиму призводить до застосування у практиці індукційного нагріву систем з невдалими конструктивними рішеннями та порівняно низькими техніко-економічними показниками.

Мета. Метою статті є викладення результатів аналізу раціональних режимів індукційного нагріву рознімних з'єднань деталей машин, що забезпечують

ефективний демонтаж з'єднань та покращують техніко-економічні показники індукційної установки.

Виклад основного матеріалу. Пристрій, що забезпечує демонтаж циліндричних з'єднань деталей машин, ілюструє рис. 1.

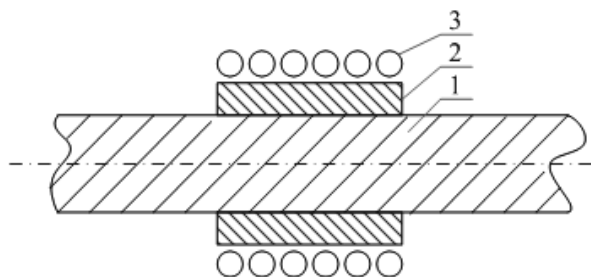


Рис. 1. Пристрій для демонтажу деталей індукційним нагрівом: 1 – вал; 2 – втулка; 3 – обмотка індуктора

Вибраний режим нагріву повинен забезпечити надійність операції демонтажу (її обов'язкову реалізацію). Увага приділяється температурному режиму нагріву в області з'єднання втулки з валом, оскільки саме тут відбувається процес ліквідації натягу посадки при розширенні втулки. Важливо розглядати не окремі локальні області з'єднання, а поверхню в цілому, бо демонтаж передбачає ліквідацію натягу в межах усієї площі контактної поверхні. Невдало вибраний режим може призвести до того, що в окремих локальних областях, або по всій поверхні з'єднання, натяг не буде ліквідований, що не призведе до реалізації операції демонтажу. Температурний режим нагріву визначається конфігурацією та параметрами діючого магнітного поля. Тому рішення задачі слід шукати в обґрунтуванні необхідних характеристик магнітного поля і визначенні на цій основі умов формування режиму нагріву.

Сучасні засоби демонтажу з'єднань повинні гарантувати високу технологічність операції, яка, у першу чергу, визначається часом, що витрачається на її проведення. Ця характеристика особливо важлива при обмеженнях тривалості ремонтних робіт. Скорочення часу нагрівання деталей призводить до зменшення витрат енергії на проведення технологічної операції й може бути досягнуто збільшенням потужності нагріву, тобто застосуванням джерела живлення підвищеної номінальної потужності. Цей шлях вирішення проблеми веде до збільшення вартості джерела живлення, зниження його техніко-економічних показників. Особливо це відчутно при використанні пристроїв силової перетворювальної техніки (перетворювачів частоти). Тому при виборі режиму слід шукати компромісне рішення, що забезпечить прийнятний показник номінальної потужності джерела живлення при незначній тривалості нагрівання.

Забезпечення надійності, технологічності та енергоефективності операції демонтажу, зменшення номінальної потужності джерела живлення складають перелік сформульованих вимог, виконання яких пок-

рає техніко-економічні показники установки індукційного нагріву та визначає її високі експлуатаційні характеристики. Сформульовані загальні вимоги до індукційного нагріву передбачають пошук умов і конкретних шляхів їх виконання. Це можливо на основі аналізу температурних режимів ліквідації натягу посадки, дослідження картини магнітного поля.

З урахуванням різноманіття видів посадок, а також характеристик сталевих виробів визначена необхідна для демонтажу з'єднання різниця температур ΔT_T між внутрішньою поверхнею втулки і поверхнею валу.

Виходячи з осової симетрії системи (симетрії щодо осі валу), значення різниці температур ΔT_T доцільно отримати одночасно у всіх точках поверхонь, що сполучаються. Це виключить перегрів окремих зон сполучення, скоротить час на ліквідацію натягу посадки по всій його поверхні. Звідси очевидна необхідність рівномірного розподілу джерел тепла на зовнішній поверхні втулки, що досягається реалізацією магнітного поля з однаковою напруженістю в усіх точках поверхні валу. У системі індукційного нагріву циліндричних з'єднань деталей розміри втулки, що нагрівається, обмежені. Тому тут виникають крайові ефекти, що не сприяють вирівнюванню інтенсивності поля. Отримання необхідної картини поля можливе шляхом зміни кроку намотування індуктора. Задача полягає в тому, щоб визначити необхідні показники зміни цього параметра. Враховуючи різноманіття конструктивних рішень з'єднань, запропоновано проведення фізичного моделювання електромагнітних процесів безпосередньо на реальному об'єкті і отримання на цій основі магнітного поля необхідної конфігурації, виходячи з конкретних вимірювань напруженості поля на поверхні, що нагрівається. Вимірювання здійснюються за допомогою секційної обмотки, розташованої на поверхні втулки. Значення ЕРС (електрорушійних сил), наведених у кожній із секцій вимірювальної обмотки, дозволяють судити про напруженість поля на ділянці втулки, де розташована відповідна секція. При рівності ЕРС у кожній із секцій отримують магнітне поле однакової напруженості. В експерименті застосовують струм частотою 50 Гц, протікання якого через індуктор не призводить до суттєвого нагріву втулки та ліквідації натягу посадки. Такий режим нагріву дозволяє застосувати просте малопотужне обладнання, що має незначну вартість. Розроблена методика формування магнітного поля, яка розкриває суть і послідовність дій, що виконуються в процесі проведення експерименту. Використання цього поля в діючій індукційній установці, для демонтажу з'єднання, забезпечує незмінне для всієї поверхні втулки значення питомої поверхневої потужності P_0 , дозволяє використовувати одновимірні моделі, що спрощує моделювання як електромагнітних, так і теплових процесів.

Показано, що вибір рівня P_0 суттєво впливає на характер протікання теплового процесу. Запропоно-

вано встановити значення P_0 , виходячи із забезпечення необхідного рівня ΔT_T у перехідному режимі нагріву. При цьому необхідні для демонтажу з'єднання температурні умови зберігаються і в стаціонарному режимі. Ця умова визначення P_0 важлива для скорочення часу нагрівання, підвищення надійності та енергоефективності технологічної операції.

Значна увага приділяється моделюванню електромагнітних процесів у системі нагріву.

Встановлено, що в умовах, характерних для індукційного нагріву деталей з метою їх демонтажу, необхідно розглядати поздовжнє одновимірне магнітне поле, яке діє в суцільному циліндрі. Обґрунтована доцільність використання аналітичного методу розрахунку електромагнітних процесів у системі, що враховує особливості, характерні для технології індукційного нагріву з'єднань (одновимірність електромагнітного поля, обмеженість глибини його проникнення товщиною втулки Δ_e) і забезпечує високу інформативність та точність результату. Уведено та обґрунтовано припущення при формуванні аналітичних залежностей для розрахунку питомої поверхневої потужності P_0 : втрати тепла із зовнішньої та бокових поверхонь відсутні.

Значення P_0 отримують із формули

$$P_0 = \alpha_e \cdot \Delta T_T \cdot \frac{R_2}{R_1}, \quad (1)$$

де α_e – контактна теплова провідність; R_1, R_2 – зовнішні радіуси втулки та валу.

Контактну теплову провідність між втулкою і валом α_e визначають шляхом ідентифікації її значення при проведенні експерименту безпосередньо на об'єкті, що підлягає демонтажу. У процесі низькотемпературного (без ліквідації натягу посадки) стаціонарного нагріву з'єднання деталей здійснюють вимірювання на боковій поверхні втулки зовнішньої T_n та внутрішньої T_e температури її поверхонь, а також температури зовнішньої поверхні валу T_{en} . Рис. 2 ілюструє точки вимірювання температури T .

При виборі частоти струму індукційної установки f_g запропоновано виходити з умови високої енергетичної ефективності процесу нагріву, обмеження проникнення електромагнітного поля у вал та з урахуванням стандартних значень вихідних частот джерел живлення. Повне затухання електромагнітної хвилі, при урахуванні залежності відносної магнітної проникності μ від напруженості поля H , відбувається на відстані від поверхні втулки $X_n = 1,68\Delta_e$. Тоді сформульована умова відповідає нерівностям

$$X_n \leq \Delta_e; \Delta_e \leq \Delta_e / 1,68, \quad (3)$$

де Δ_e – товщина втулки; Δ_e – глибина проникнення електромагнітної хвилі, розрахована, виходячи із значення μ на поверхні втулки (μ_e). Для граничного режиму $\Delta_e = \Delta_e / 1,68$ характерне „глибоке“ прогрівання втулки. Цьому режиму відповідає нижнє значення рекомендованого діапазону частот струму індуктора f_n . На рис. 3 наведені залежності $f_n(P_0)$.

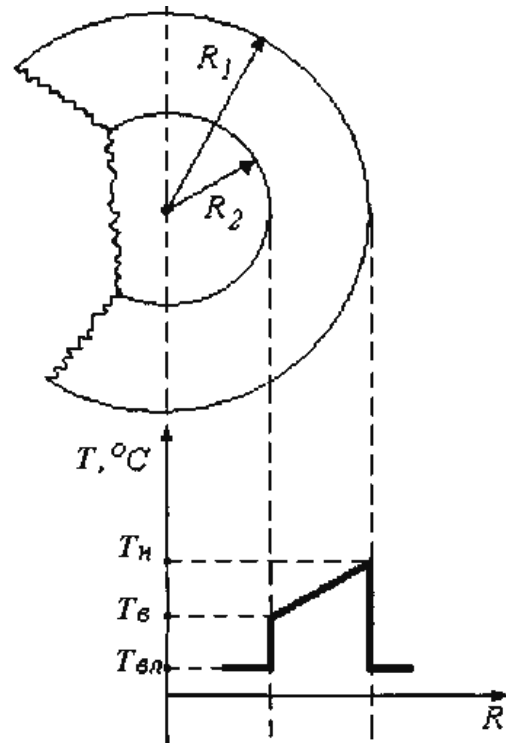


Рис. 2. Характер розподілу температури в стаціонарному режимі нагріву з'єднання

Значення α_e отримують із формули

$$\alpha_e = \frac{(T_n - T_e) \lambda_{cm}}{(T_e - T_{en})(R_1 - R_2)}, \quad (2)$$

де λ_{cm} – коефіцієнт теплопровідності сталі.

Вихідну частоту джерела живлення вибирають з урахуванням її стандартних значень та виконанням умови $f_g \geq f_n$. На рис. 3 видно, що при товщині втулки, що перевищує 2 см, можна здійснювати нагрів на промисловій частоті струму 50 Гц.

При менших значеннях товщини, а також при масогабаритних обмеженнях у конструктивному виконанні доцільне використання підвищених частот струму (одиниці кГц).

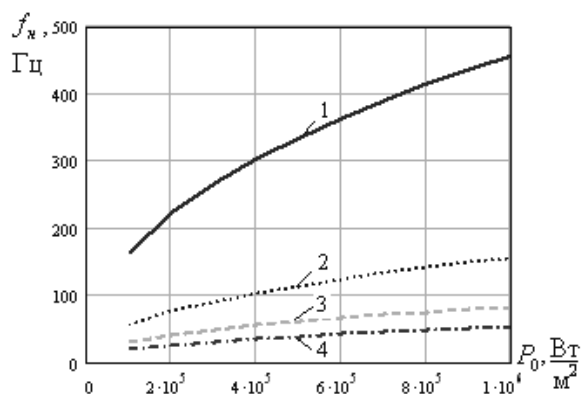


Рис. 3. Залежності нижнього значення рекомендованого діапазону частот струму індуктора f_n від питомої поверхневої потужності P_0 : 1 – $\Delta_e = 0,005$ м; 2 – $\Delta_e = 0,01$ м; 3 – $\Delta_e = 0,015$ м; 4 – $\Delta_e = 0,02$ м

На основі проведення дослідження створена математична модель, що орієнтована на визначення параметрів режиму P_0, f_g, H_e (H_e – діюче значення напруженості магнітного поля на поверхні втулки), які забезпечують температурні умови демонтажу з'єднання та використовуються для розрахунку індуктора, вибору номінальної потужності джерела живлення за відомими методами.

Процес демонтажу з'єднання деталей безпосередньо пов'язаний із температурними режимами нагріву. Тому виникла необхідність оцінки впливу електромагнітних параметрів на характер протікання теплового процесу, підтвердження їх прийнятності для проведення технологічної операції. Це зумовило створення математичної моделі для дослідження перехідних і стаціонарних теплових процесів, що протікають у поперечному перетині втулки. Реалізація одновимірного поздовжнього магнітного поля, що діє у втулці, дозволила нестационарний процес індукційного нагріву з'єднання описати одновимірним у просторі диференціальним рівнянням теплопровідності другого порядку в часткових похідних. При цьому врахований вплив розширення втулки на значення контактної теплової провідності α_c зони з'єднання деталей, а також реалізована можливість розрахунку процесу при наявності в індукторі струму імпульсної форми. Моделювання дії імпульсного струму індуктора здійснюється шляхом періодичного введення та виведення з дії джерел тепла, зосереджених в активному шарі втулки, що дозволяє аналізувати можливості частотно-імпульсного управління процесом нагріву. Нелінійність рівняння теплопровідності та граничних умов зумовлює використання числового методу розрахунку теплового процесу з формуванням кінцево-різницевого рівнянь та застосуванням методу прогонки.

На характер протікання теплового процесу у втулці впливає низка чинників: питома поверхнева

потужність P_0 , частота струму індуктора f , значення контактної теплової провідності α_c . Моделювання процесу нагріву свідчить про те, що на підвищених частотах струму індуктора необхідне для демонтажу з'єднання значення ΔT_T досягається при більш високому рівні температури на зовнішній поверхні втулки, що пояснюється більш вираженим поверхневим ефектом. Цю залежність слід урахувати при визначенні раціонального значення частоти струму. Встановлено, що вплив частоти струму на характер розвитку теплового процесу проявляється в різних значеннях затримки зростання різниці температур ΔT відносно моменту початку нагріву, що пояснюється характером розташування джерел тепла в перетині втулки. При $\alpha_c = const$ збільшення питомої поверхневої потужності призводить до зменшення тривалості циклу нагріву t_y з'єднання деталей. Характерна нелінійність цієї залежності з суттєвим ростом тривалості в області малих значень потужності (рис. 4). Тут $n = P_p / P_0$.

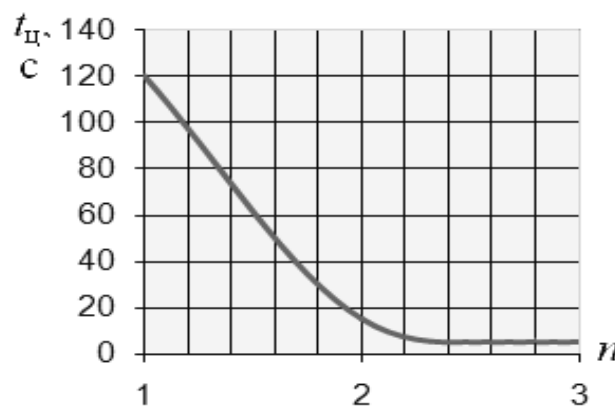


Рис. 4. Залежність тривалості циклу нагріву t_c від змінної $n = P_p / P_0$

Зменшення в процесі нагріву значення α_c аналогічне дії підвищеної поверхневої потужності, що забезпечує зниження тривалості циклу нагріву. Зменшення теплової контактної провідності α_c суттєво змінює характер розподілення температури в перетині втулки. Спостерігається вирівнювання температури T у зоні, близькій до її внутрішньої поверхні (рис. 5). Необхідне для демонтажу з'єднання значення $\Delta T = \Delta T_T$ досягається при менших значеннях температури зовнішньої поверхні втулки. Збільшення тривалості нагріву супроводжується підвищенням швидкості зростання ΔT , що пояснюється температурною деформацією втулки (рис. 6). Гальмування росту ΔT на початковому етапі нагріву пояснюється значним α_c , що відповідає тісному контакту між втулкою та валом.

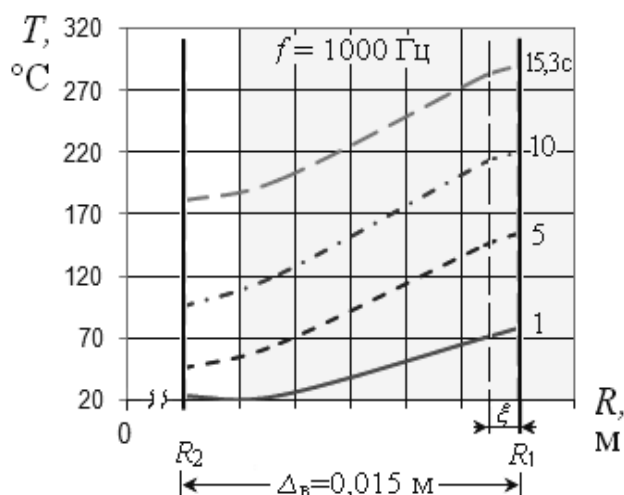


Рис. 5. Розподіл температур з урахуванням залежності контактної теплової провідності α_c від різниці температур ΔT : ξ – глибина активного шару дії струму

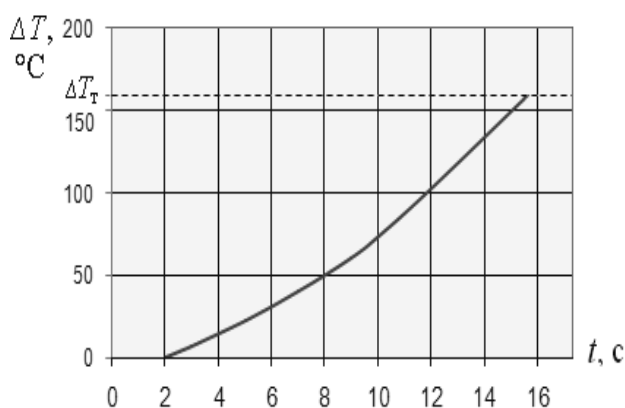


Рис. 6. Залежність різниці температур ΔT від часу нагріву t при зміні контактної теплової провідності α_c у процесі нагрівання втулки

Залежність, що ілюструє рис. 5, отримана при розрахунковому значенні питомої поверхневої потужності P_0 , що підтверджує факт виникнення необхідного для демонтажу з'єднання температурного режиму ($\Delta T = \Delta T_T$) у перехідному режимі нагрівання. Встановлено, що при зменшенні товщини втулки Δ_c тривалість циклу нагріву t_u зменшується. Збільшення P_0 призводить до більш суттєвого зменшення t_u . Характер цих залежностей є наслідком дії теплопровідності в сталі. У результаті моделювання дії імпульсного струму індуктора доведено, що збільшення частоти синусоїдальних імпульсів підвищує швидкість росту різниці температур ΔT , що свідчить про можливість управління температурним режимом нагріву.

Створено макет установки для вирівнювання напруженості магнітного поля на поверхні втулки та ідентифікації контактної теплової провідності α_c . У результаті зміни кроку намотування обмотки індуктора ступінь нерівномірності значень напруженості поля зменшилася вдвічі, що підтвердило прийнятність розробленої методики для виконання практичних завдань безпосередньо в умовах проведення монтажних робіт.

Для ідентифікації значення контактної теплової провідності зони з'єднання втулки з валом α_c за допомогою експериментальної установки здійснювався низькотемпературний (до 50°C) нагрів поверхні втулки. У стаціонарному режимі нагріву за допомогою безконтактного пірометра вимірювались температури на боковій поверхні втулки та поверхні валу. Значення α_c розраховувалося з використанням запропонованого вище алгоритму. Отримане з експерименту значення параметра α_c свідчить про те, що при значному натягу посадки існують сприятливі умови для передачі тепла від втулки до валу. Значення α_c суттєво (на два порядки) перевищує значення коефіцієнта тепловіддачі із зовнішньої поверхні втулки α_3 .

Вимірювання значень температур на боковій поверхні втулки в перехідному режимі нагріву дозволило оцінити ступінь збігу результатів теоретичних (отриманих при моделюванні теплового процесу) та експериментальних досліджень. Похибка розрахунку температури, з урахуванням похибки пірометра, не перевищила 5%.

Розробка методики визначення питомої поверхневої потужності P_0 та інших параметрів режиму на поверхні втулки дозволяє здійснювати обґрунтований вибір параметрів індуктора та джерела живлення, відмовитись від існуючого у практиці індукційного нагріву завищення номінальної потужності цього джерела. У разі обґрунтованого вибору потужності економія коштів на придбання однієї установки складає декілька тисяч доларів. Суттєво (на десятки відсотків) зменшується вага та габарити джерела живлення, що свідчить про покращення масогабаритних показників індукційної установки.

Висновки. Встановлено закономірності протікання взаємозв'язаних електромагнітних, теплових процесів та температурної деформації в системі індукційного нагріву з'єднання деталей з урахуванням зміни в процесі нагріву контактної теплової провідності. Це дозволяє визначити раціональні параметри режиму, що забезпечують ефективний демонтаж з'єднання, і завдяки цьому підвищити експлуатаційний ресурс деталей машин, покращити техніко-економічні показники установок індукційного нагріву.

Список літератури / References

1. Моделирование и расчет электромагнитного поля в цилиндрическом теплообменнике индуктивно-кондуктивного нагревателя [текст] / Инкин А.И., Че-

редниченко В.С., Хацевский К.В., Ивликов С.Ю. // *Электротехника*. – 2000. – № 11. – С. 34–37.

Inkin, A.I., Cherednichenko, V.S., Khatsevsky, K.V. and Ivlikov, S.Yu. (2009), “Modelling and calculation of the electromagnetic field in a cylindrical inductive-conductive heat exchanger of a heater”, *Elektrotehnika*, Vol. 6, pp. 61–66.

2. Шукин В.Г. Высокоэнергетическая индукционная обработка стальных деталей [текст] // В.Г. Шукин, В.В. Марусин // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2007. – № 1. – С. 70–76.

Shchukin, V.G. and Marusin, V.V. (2007), “High-energy induction treatment of steel parts”, *Problemy mashinostroyeniya*, no.1, pp. 70–76.

3. Pivnyak, G.G and Dreshpak, N.S. (2011), *Induction Heating in Electrotechnology of Machine Parts Dismantling*. Netherlands: CRC Press, Balkema, 2:1–6.

Цель. Целью статьи является анализ рациональных режимов индукционного нагрева разъемных соединений деталей машин, которые обеспечивают эффективный демонтаж соединений и улучшают технико-экономические показатели существующих установок индукционного нагрева.

Методы. Аналитический метод расчета – для исследования электромагнитных процессов в одномерном поле; метод физического моделирования – для выравнивания напряженности магнитного поля на поверхности втулки и идентификации контактной тепловой проводимости; оценки достоверности математического моделирования; численный метод расчета с формированием конечно-разностных уравнений и использованием метода прогонки – для исследования теплового процесса индукционного нагрева; метод интерполяции – для установления зависимости контактной тепловой проводимости от разности температур контактирующих поверхностей; метод оптимизации – при обосновании требований к процессу демонтажа соединений и определении рациональных режимов.

Результаты. Электрическая удельная поверхностная мощность индукционного нагрева, которая обеспечивает демонтаж соединения деталей, прямо пропорциональна идентифицированному значению контактной тепловой проводимости и необходимой для выполнения технологической операции разности температур между контактными поверхностями втулки и вала.

Научная новизна. Научная новизна заключается в установлении закономерностей протекания взаимосвязанных электромагнитных, тепловых процессов и процессов температурной деформации, протекающих в системе индукционного нагрева соединения деталей машин.

Практическая значимость. Выполненные теоретические исследования составили основу для создания методики расчета удельной поверхностной

мощности на основе идентифицированного значения тепловой проводимости, методики выравнивания напряженности поля на поверхности втулки и устройства, осуществляющего такое выравнивание непосредственно на объекте для демонтажа, а также способа управления операцией демонтажа соединения деталей, который заключается в изменении частоты следования импульсов тока индуктора.

Ключевые слова: *индукционный нагрев, посадка с натягом, демонтаж соединений*

Purpose. To analyze rational modes of induction heating of machine parts with detachable connections providing efficient dismantling of the connections and improving technical and economic performance of existing induction heating installations.

Methodology. Analytical method of calculation has been used for studying electromagnetic processes in the one-dimensional field. The method of physical modeling has been used for leveling the magnetic field on the surface of the plug and the contact thermal conductivity identification and supported by method of validation of mathematical modeling accuracy. Numerical method of calculating forming finite-differential equations and the method of factorization has been used for study of the thermal process of induction heating. Interpolation method has been used for determine the contact thermal conductivity depending on the temperature difference between the contacting surfaces. And the method of optimization was used for substantiation of the connections dismantling process and determination of its rational modes.

Findings. The specific surface electric power of induction heating, which provides details connection dismantling, is directly proportional to the identified value of the contact thermal conductivity and the temperature difference between the contact surfaces of the plug and shaft, required to perform the technological operation.

Originality. The flow patterns of interconnected electromagnetic thermal processes and temperature deformation processes occurring in the induction heating system of the machine parts connection have been determined.

Practical value. The carried out theoretical studies have formed the basis for the establishment of methods for calculating the specific surface power on the basis of the identified values of the thermal conductivity, the method of leveling the field strength on the surface of the plug, and the device that is aligned directly on the site for dismantling, as well as ways to control the details connection dismantling operation which is to change the pulse repetition rate of inductor current.

Keywords: *induction heating, interference fit, connections dismantling*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Корсунем. Дата находження рукопису 19.03.12.