

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

УДК 621.365.5

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ З'ЄДНАНИХ З НАТЯГОМ МЕТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ

А.К. Шидловський, акад. НАН України, **А.Ф. Жаркін**, чл.-кор. НАН України, **Ю.М. Гориславець**, докт. техн. наук, **В.О. Новський**, докт. техн. наук, **О.І. Глухенький**, канд. техн. наук, **О.І. Бондар**
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: ugoris@ied.org.ua

Запропоновано математичну модель для чисельного дослідження електромагнітних, теплових і механічних процесів при індукційному нагріванні посаджених з натягом металевих деталей. Електромагнітний процес у моделі описано диференціальними рівняннями відносно комплексного векторного магнітного потенціалу при заданій напрузі, що дає змогу безпосередньо узгоджувати індукційну систему з джерелом живлення. Теплову задачу сформульовано у вигляді нестационарного рівняння теплопровідності з внутрішніми джерелами тепла від вихрових струмів, наведених у матеріалі деталей. Внутрішньо механічний процес представлено диференціальними рівняннями механічної рівноваги, розв'язання якого дає можливість визначити термомеханічні напруження і деформації при нагріванні. На прикладі демонтажу алюмінієвих дисків зі сталюї ступиці опорного котка гусеничного транспортного засобу досліджено термомеханічний процес при нагріванні деталей за допомогою запропонованої електромагнітної системи, що складається із двох котушок та спільного магнітопроводу. Бібл. 11, рис. 4, таблиця.

Ключові слова: індукційне нагрівання, математична модель, мультифізичне моделювання, електромагнітна система, демонтаж посаджених з натягом металевих деталей.

Вступ. Індукційне нагрівання металевих матеріалів останнім часом набуває все більш широкого застосування. В першу чергу це зумовлено достатньо високою ефективністю такого типу нагрівання, оскільки джерела тепла знаходяться у самому металі, можливістю реалізації вибіркового (місцевого) нагрівання, простотою керування процесом з реалізацією автоматичного керування, задовільною екологією, можливістю досягнення за необхідності високошвидкісного нагрівання металу. Індукційне нагрівання використовують для паяння і зварювання, для пластичної деформації (ковка, штамповка, прокатка, пресування, волочіння), для термообробки деталей і заготовок (гартування, відпуск, нормалізація), для нагрівання деталей у процесі ремонту промислового і транспортного обладнання тощо. Нагріванню підлягають деталі, які виготовлені як з феромагнітного, так і неферомагнітного металевого матеріалу [1].

Високочастотне індукційне нагрівання є одним із найбільш ефективних засобів проведення операцій по монтажу і демонтажу вузлів і деталей, з'єднаних шляхом гарячої (напруженої) посадки (посадки з натягом). Такі посадки давно увійшли у практику машинобудування. Вони мають важливе значення при вирішенні цілого ряду технічних питань. Їх застосовують у машино- й верстатобудуванні, на залізниці, гусеничному транспорті цивільного і військового призначення та в інших галузях техніки. Суть гарячої посадки полягає у тому, що на вал насаджують деталь з діаметром отвору, меншим ніж діаметр вала. Її нагрівають до температури 200...400 °С для збільшення діаметра отвору шляхом температурного розширення металу і встановлюють у нагрітому стані на вал. Після охолодження деталі виникає міцне з'єднання, що витримує необхідні робочі зусилля. Різниця між діаметрами деталі й вала у холодному стані (натяг) становить від часток міліметра до декількох міліметрів.

Зазор між валом і нагрітою деталлю при посадці зазвичай не перевищує 1...2 мм [2].

Як правило, індукційне нагрівання з метою демонтажу деталей є більш складною технологічною операцією, ніж нагрівання під посадку. В останньому випадку досить лише окремо нагріти зовнішню деталь до встановленої температури, а при демонтажі необхідно в процесі нагрівання зовнішньої деталі обмежити істотне нагрівання внутрішньої. У багатьох випадках ця задача до того ж ускладнюється обмеженими можливостями просторового розміщення індуктора. Саме тому при демонтажі деталей з натягом можуть бути ефективно використані особливості високочастотного індукційного нагрівання, що проявляються в локалізованому виділенні теплоти у поверхневому шарі деталей.

За допомогою індукційного нагрівання не завжди вдається роз'єднати деталі, іноді можливе лише зменшення їх напруженого стану, що дає змогу знизити зусилля преса, який використовується для роз'єднання (розпресування) деталей. У разі неправильно спроектованої індукційної системи можна отримати зворотну ситуацію, тобто одержати збільшення зусилля преса. Ось чому особливої уваги при розробленні такого обладнання заслуговує саме індукційна система (індуктор), яка призначена для передачі енергії від джерела живлення в деталь, що нагрівається [3, 4]. Вибір конструкції індуктора у кожному конкретному випадку проводиться з урахуванням технологічних обмежень ведення процесу нагрівання (за їх наявності), конструктивних особливостей деталей, можливої умови прямого вмикання індуктора до перетворювача (без узгоджувального трансформатора), функціональних можливостей джерела живлення.

Під технологічними обмеженнями ведення процесу індукційного нагрівання зазвичай мається на увазі неприпустимість значного перегрівання деталей для забезпечення збереження кристалічної структури та відповідно механічних властивостей металевих матеріалів, а також обмеження допустимих термічних напружень у процесі нагрівання значеннями, що не призводять до руйнування деталі.

Вибір типу електромагнітної системи та геометрії індуктора головним чином визначає конструкція деталі, що підлягає демонтажу. На практиці зустрічаються задачі знімання (роз'єднання) деталей складної конфігурації, причому підведення індуктора до деталі найчастіше можливе лише в обмеженій області. Наприклад, у разі розформування колісних пар вантажних вагонів розташувати індуктор можна лише із зовнішнього боку [5].

Однією з основних задач, що виникають при розробленні індукційних систем для високочастотного нагрівання, є вибір оптимальної для того чи іншого технологічного процесу частоти струму живлення. Ця частота, як відомо, залежить від фізичних властивостей матеріалу деталі, що підлягає нагріванню, а саме: питомої електропровідності й магнітної проникності, її геометричних розмірів, а також від заданих умов нагрівання (швидкості нагрівання, глибини прогрівання металу тощо).

Такі системи у своєму складі, окрім котушки, можуть мати феромагнітне осердя (магнітопровід), яке дає змогу сконцентрувати магнітний потік та збільшити індуктивний зв'язок між котушкою і деталлю, що нагрівається. Принагідно зазначити, що у випадку нагрівання феромагнітної деталі (до точки Кюрі) вона може одночасно служити одним із складових елементів осердя індуктора.

У цьому випадку вибір конструкції індукційних систем проводився за умови їх живлення від спеціально створеного в Інституті електродинаміки НАН України для цих цілей багатофункціонального джерела живлення – енергозберігаючої електротермічної установки ЕТУ-250 [6]. Установка ЕТУ-250 – це напівпровідниковий перетворювач частоти, побудований на основі однофазного високочастотного інвертора напруги з незалежним керуванням, який виконано на сучасній елементній базі (інтелектуальних IGBT – модулях), що забезпечує можливість оптимального живлення різноманітних навантажень, зокрема дозволяє забезпечити автоматичну підтримку на заданому рівні параметрів електротермічного процесу та відповідно параметричну стабілізацію вихідної потужності. Функціональні можливості цієї установки при використанні її як джерела високочастотного нагрівання визначаються такими технічними характеристиками: максимальна повна вихідна потужність – 250 кВА, вихідна

частота – (0,5...30) кГц; вихідна напруга (не регулюється) – 600 В; максимальний струм – 1200 А. Напруга і струм тут представлені амплітудними значеннями їх перших гармонік. Пряме узгодження індукційної системи з перетворювачем ЕТУ-250 за напругою забезпечувалося вибором відповідної кількості витків індуктора.

Нагрівання деталей у загальному випадку призводить до виникнення у них механічних напружень (які ще називають термічними напруженнями), під дією яких виникають деформації та зміщення деталі. У випадку рівномірного нагрівання циліндричної деталі з отвором, її розширення внаслідок нагрівання достатньо просто можна оцінити за формулою [2]

$$\Delta T = \frac{\Delta D}{\alpha \cdot D}, \quad (1)$$

де ΔT – температура нагрівання деталі; D – діаметр отвору деталі при температурі 20 °С; ΔD – необхідне збільшення діаметра отвору при нагріванні; α – коефіцієнт лінійного розширення металу.

При індукційному нагріванні деталі її температурне поле нерівномірне як у процесі нагрівання, так і під час проведення операцій монтажу і демонтажу. При цьому для досягнення необхідного розширення середня температура деталі, а отже, і тепловміст, мають бути більшими, ніж при рівномірному нагріванні із-за внутрішніх механічних напружень і деформацій. У цьому випадку значення температури, отримане за формулою (1), буде оцінкою знизу. Окрім того, при знятті деталі з посадки до моменту втрати контакту між деталлю і валом відбувається передача тепла до валу, що призводить до його розширення. У цьому випадку оцінка (1) є мінімальною різницею температур між валом і деталлю (у випадку однакових коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів деталі й вала).

Більш точні оцінки досягнення необхідних деформацій при заданих обмеженнях на температуру нагрівання може дати комп'ютерне мультифізичне моделювання – чисельне розв'язування взаємопов'язаних електромагнітних, теплових і механічних (деформаційних) задач при точному заданні форми та властивостей деталі й індуктора [7].

Метою цієї роботи є дослідження фізичних процесів при індукційному нагріванні металевих деталей, з'єднаних між собою з натягом, а також визначення параметрів електромагнітних індукційних систем, які за рахунок нагрівання знімають цей натяг, забезпечуючи таким чином можливість подальшого роз'єднання (демонтаж) зазначених деталей.

Математична модель фізичних процесів в електромагнітній системі індукційного нагрівання. Будемо розглядати індукційну систему циліндричної (осесиметричної) форми, яка в загальному плані включає в себе індуктор (котушку), шихтоване феромагнітне осердя (магнітопровід) і металеву деталь, що підлягає нагріванню. Деталей може бути декілька (як зв'язаних, так і незв'язаних між собою), які в свою чергу можуть бути виконані із феромагнітного або неферомагнітного (немагнітного) матеріалу.

Електромагнітна задача. Вважається, що індукційна система живиться від джерела заданої синусоїдної напруги \dot{U} . Враховуючи циліндричну форму системи, електромагнітний процес у ній можна описати диференціальними рівняннями відносно комплексного векторного магнітного потенціалу $\dot{\mathbf{A}}(0, A_\varphi, 0)$ і струму в індукторі \dot{I} у циліндричній системі координат (r, φ, z) [7, 8].

Рівняння для векторного потенціалу:

$$j\omega\sigma\dot{\mathbf{A}} + \nabla \times ((\mu_0\mu(H))^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0 \quad \text{в області деталі;} \quad (2)$$

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \frac{\dot{I}_w}{S} \quad \text{в області індуктора;} \quad (3)$$

$$\nabla \times ((\mu_0\mu_{Fe})^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0 \quad \text{в області магнітопроводу;} \quad (4)$$

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0 \quad \text{у навколишній області;} \quad (5)$$

де ω – кругова частота; σ – питома електропровідність; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, μ_{Fe} – відносна магнітна проникність магнітопроводу; $\mu(H)$ – залежність відносної магнітної проникності від

напруженості магнітного поля (для феромагнітної деталі); w – число витків індуктора; S – площа поперечного перерізу індуктора.

Рівняння балансу напруги запишемо як

$$\dot{U} = \dot{I}R_{AC} + j\omega\dot{\Psi}, \quad (6)$$

де $\dot{\Psi} = \frac{w}{S} \int 2\pi r \dot{A}_\phi dS$ – потокозчеплення індуктора; R_{AC} – активний опір індуктора. Звідси

струм індуктора в рівнянні (3) задається не явно, а через значення напруги джерела живлення та кількість витків котушки індуктора: $\dot{I} = (\dot{U} - j\omega\dot{\Psi}) / R_{AC}$.

У цих рівняннях значення питомої електропровідності σ та відносної магнітної проникності μ приймалися незалежними від температури (середніми за час нагрівання).

Залежність $\mu(H)$ для заданого феромагнітного матеріалу деталі представлялась нелінійною кривою намагніченості $B(H)$, яка в свою чергу інтерполювалась ефективною залежністю $B_{\text{еф}}(H)$ відповідно до [9]. Використання ефективною кривою намагніченості дає змогу, не вдаючись до розрахунків нестационарних процесів, які потребують великих розрахункових ресурсів, обчислювати електромагнітне поле для систем з нелінійним феромагнітним матеріалом у частотній області.

Граничними умовами для електромагнітної задачі були умова симетрії на осі та умова магнітної ізоляції на зовнішніх границях ($\dot{A} = 0$).

Теплова задача. Теплова задача розв'язувалася для деталі (деталей) відносно невідомого розподілу температури T відповідно до наступного рівняння:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot \lambda \nabla T = Q, \quad (7)$$

де ρ , C_p , λ – густина, питома теплоємність і теплопровідність матеріалу деталі (середні за час нагрівання); Q – середня за період питома потужність внутрішніх джерел тепла в деталі, яка визначається формулою

$$Q = \frac{1}{2} \frac{\dot{J} \cdot \dot{J}}{\sigma} = \frac{1}{2} \cdot \omega^2 \sigma (\dot{A}_\phi^* \dot{A}_\phi), \quad (8)$$

де $\dot{J} = -j\omega\sigma\dot{A}_\phi$ – густина наведеного (вихрового) струму; \dot{A}_ϕ^* – комплексно-спряжена величина магнітного потенціалу.

Для теплової задачі приймалась гранична умова Неймана $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$ на осі симетрії, а на зовнішній (вільній) поверхні деталі задавалися умови конвективного та променевого теплообміну з навколишнім середовищем

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = k(T - T_0) + \xi \sigma_B (T^4 - T_0^4), \quad (9)$$

де k – коефіцієнт тепловіддачі; ξ – відносна випромінювальна здатність поверхні; $\sigma_B = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – постійна Стефана-Больцмана; T_0 – температура навколишнього середовища; n – вектор зовнішньої нормалі до поверхні.

Для внутрішньої поверхні між з'єднаними з натягом деталями задавалася гранична умова контактного теплообміну. Початковою температурою деталей вважалася температура навколишнього середовища T_0 .

Механічна задача. Диференціальне рівняння, що описує внутрішню механіку деформації твердого тіла в нестационарному режимі, як відомо, має такий вигляд:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \sigma_M = \mathbf{F}. \quad (10)$$

Тут \mathbf{F} – вектор густини об'ємної сили; ρ – густина тіла; $\mathbf{u} = (u, w)$ – вектор зміщень (u і w – складові вектора за координатами r і z відповідно); σ_M – тензор механічних напружень, який має у своєму складі нормальні напруження σ_{Mr} , $\sigma_{M\phi}$, σ_{Mz} та напруження зсуву σ_{Mrz} .

Коли механічна задача розв'язується спільно з тепловою, то з урахуванням теплового розширення матеріалу тензор механічних напружень σ_M виражається через тензор деформації ε_M таким чином [7]:

$$\sigma_M = D(\varepsilon_M - \varepsilon_{M0} - \varepsilon_T) + \sigma_{M0}, \quad (11)$$

де σ_{M0} і ε_{M0} – початкові напруження і деформації; ε_T – деформація внаслідок температурного напруження; D – матриця жорсткості, яка визначається з врахуванням пружних властивостей матеріалу – модуля Юнга E і коефіцієнта Пуассона ν .

Деформація ε_T для металевих матеріалів розраховується як

$$\varepsilon_T = [\varepsilon_{Mr}, \varepsilon_{M\phi}, \varepsilon_{Mz}, \varepsilon_{Mrz}]^T - [\alpha, \alpha, \alpha, 0]^T \cdot (T - T_0), \quad (12)$$

де α – коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу; T_0 – початкове значення температури; $T = T(r, z)$ – температура матеріалу деталі, яка визначається із рішення теплової задачі. У цьому виразі компоненти лінійної деформації

$$\varepsilon_{Mr} = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_{M\phi} = \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_{Mz} = \frac{\partial w}{\partial z},$$

а деформація зсуву

$$\varepsilon_{Mrz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right).$$

При розв'язанні механічної задачі приймалися наступні граничні умови: $\mathbf{u} = 0$ – умова на закріплених границях твердого тіла (деталі); $\mathbf{n} \cdot \mathbf{u} = 0$ – умова на осі симетрії; $\sigma_M = 0$ – умова на вільних від зовнішніх навантажень і силових факторів границях.

Пов'язані задачі розрахунку електромагнітного поля, температурного поля та напружено-деформованого стану металевих деталей (деталей) розв'язувалися методом скінченних елементів за допомогою комп'ютерної програми Comsol Multiphysics [10]. Алгоритм розрахунку приймався наступним. Спочатку розв'язувалася стаціонарна електромагнітна задача, в результаті чого визначалися внутрішні джерела тепла в деталі та електромагнітні параметри індукційної системи нагрівання. Після цього сумісно розв'язувалися нестационарні теплова і механічна задачі, що дало можливість у кінцевому рахунку визначити відносне зміщення деталей у процесі нагрівання.

Далі на конкретному прикладі демонтажу металевих деталей розглянемо можливість використання наведеної вище розрахункової моделі.

Моделювання індукційного нагрівання з'єднаних з натягом металевих деталей.

Розглянемо застосування індукційного нагрівання в ремонтних операціях на прикладі демонтажу дисків з алюмінієвого сплаву (сплав АК6) зі сталюї ступиці (сталь 25ЛШ) опорного котка гусеничного транспортного засобу. На рис. 1 представлено зовнішній вигляд одного з варіантів такого котка з гумовою амортизацією. Конструкція котка включає два однакових алюмінієвих диски зі сталюми ребордами, які закріплено підпружиненими стопорними шайбами. Основні розміри опорного котка з алюмінієвими дисками, які з натягом у 0,1 мм насаджено на сталю ступицю, представлено на рис. 2. Цифрами на цьому рисунку позначено: 1 і 6 – гума; 2 – зовнішній диск; 3 – реборда; 4 – стопорна шайба; 5 – внутрішній диск; 7 – ступиця.

Додатково після посадки з натягом диски на ступиці стягуються між собою болтами. Тому демонтаж дисків шляхом індукційного нагрівання можливий лише після знімання котка з осі та розкручування болтів.

Слід зазначити, що на відміну від феромагнітних деталей індукційне нагрівання кольорових металів, зокрема алюмінієвих сплавів, є більш складним з точки зору можливості введення в них значних потужностей для нагрівання. З іншого боку, інтенсивність нагрівання нерідко обмежується гранично допустимим перепадом температури в поперечному перерізі деталі. Зокрема, для сплаву АК6 таким вважається перепад температури у 40 °С [11].

Аналізуючи конструкцію представленого опорного котка, можна дійти висновку, що варіант розміщення індуктора між дисками для їх одночасного нагрівання є доволі складним



Рис. 1

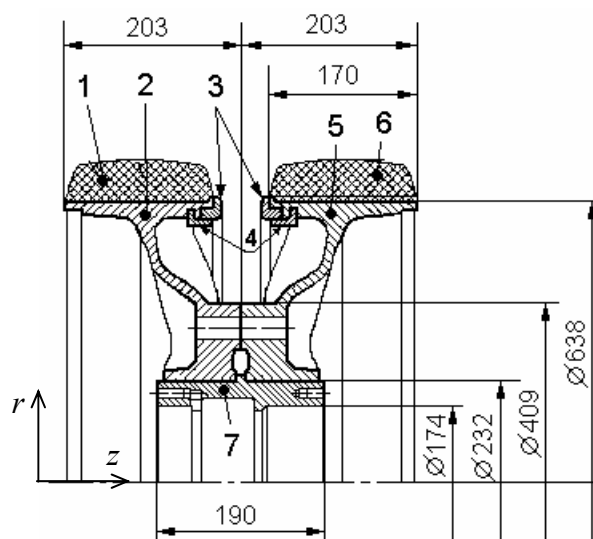


Рис. 2

у реалізації. Він потребує або намотування багатовиткового безкаркасного індуктора гнучким проводом (що досить непросто), або створення складної конструкції роз'ємного індуктора. Тож був прийнятий варіант з почерговим зняттям дисків зі ступиці при боковому зовнішньому розташуванні індуктора.

Намагання створити індуктор у вигляді котушки з криволінійним профілем поперечного перерізу, що прилягає до диска, окрім складної конструкції призвели (як показали попередні розрахунки) ще й до значного перегрівання диска в найбільш тонкій його частині. Тому було прийнято рішення виконати індуктор у вигляді двох окремих котушок, перша з яких (внутрішня) розміщується ближче до ступиці, друга (зовнішня) – ближче до обода диска. Такий підхід дає можливість значною мірою вирівняти розподіл температури в поперечному перерізі диска. Для підвищення енергетичних показників індукційного нагрівання та концентрації магнітного потоку в зоні диска з метою зменшення нагрівання ступиці запропоновано використати шихтований феромагнітний магнітопровід.

Розрахункову область мультифізичної задачі представлено на рис. 3, де через $\Omega 1$ позначено область, яку займає диск, область $\Omega 2$ відноситься до ступиці, область $\Omega 3$ займає індуктор з внутрішньою і зовнішньою котушками, область $\Omega 4$ – це магнітопровід, а $\Omega 5$ – навколишнє середовище (реборда і стопорна шайба котка не розглядалися). Магнітопровід запропоновано виконати у вигляді шести окремих пакетів так, щоб внутрішні їх стрижні можна було вставити у заглиблення диска для стяжних болтів (див. рис. 1). Розрахункова сітка для чисельного розв'язання мультифізичної задачі також зображена на рис. 3.

Розрахунок електромагнітної задачі виконувався при заданій напрузі з амплітудним значенням 600 В. Котушки вважалися з'єднаними послідовно. У тепловій задачі у першому наближенні контакт між ступицею та диском у процесі індукційного нагрівання приймався ідеальним, термічний опір між ними не враховувався. Втратами тепла з поверхні нехтували.

У механічній задачі початкові напруження σ_{M0} умовно вважалися відсутніми, а тому сумісний розрахунок нестационарних теплової і механічної задач проводився в часі до появи проміжку Δ між деталями величиною у 0,2 мм,

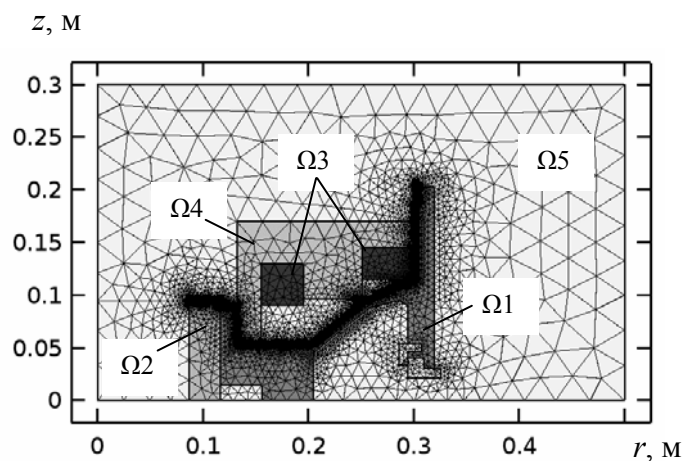


Рис. 3

з якої умовно 0,1 мм означав натяг, а ще 0,1 мм – реальний зазор, необхідний для вільного роз'єднання деталей.

У процесі розрахунків варіювалась кількість витків кожної котушки. За мету ставилося досягнення якнайшвидшого достатнього для демонтажу диска нагрівання при допустимому (приблизно до 40 °С) перепаді температури в поперечному перерізі диска.

В таблиці представлено основні розрахункові показники індукційного нагрівання алюмінієвого диска опорного котка залежно від кількості та співвідношення витків внутрішньої (w_1) та зовнішньої (w_2) котушок. Представлені результати одержано для максимального струму установки ЕТУ-250, тобто 1200 А. Для такого струму котушки пропонується виконати водоохолоджуваними. В розрахунках приймалося, що вони виготовлені з мідної трубки зовнішнім діаметром 12 мм і товщиною стінки 1,5 мм.

№	w_1	w_2	f , Гц	$P_{\text{дис}}$, кВт	$P_{\text{кот}}$, кВт	$t_{\text{нагр}}$, с	T_{max} , °С	ΔT , °С	η , %	$\cos\phi$
1	8	5	820	11,19	4,16	344	150	52	72,9	0,043
2	8	6	773	12,74	4,58	336	157	58	73,6	0,048
3	8	7	725	14,41	4,97	328	176	77	74,3	0,054
4	9	6	635	12,91	4,81	312	155	46	72,9	0,049
5	9	7	600	14,51	5,24	306	164	56	73,5	0,055
6	9	8	565	16,20	5,64	300	184	76	74,1	0,061
7	10	7	503	14,70	5,50	286	162	46	72,8	0,056
8	10	8	477	16,31	5,93	282	171	57	73,3	0,062
9	10	9	451	18,02	6,34	276	190	76	74,0	0,068

У цій таблиці для дев'яти варіантів виконання індуктора наведено розрахункові значення частоти живлення f , потужності тепла, що виділяється у диску $P_{\text{дис}}$ і в обох котушках індуктора $P_{\text{кот}}$, час нагрівання $t_{\text{нагр}}$, за який досягається необхідне значення зазору Δ між деталями, максимальні значення температури у тілі диска T_{max} і максимальний перепад температури ΔT , а також ККД електромагнітної системи η та її коефіцієнт потужності $\cos\phi$.

Аналізуючи представлені в таблиці результати, перш за все слід звернути увагу на досить низький коефіцієнт потужності $\cos\phi$ системи, який навіть за наявності шихтованого феромагнітного магнітопроводу сягає значень 0,043...0,068. Більші значення коефіцієнта потужності отримано при менших частотах. Зі збільшенням загальної кількості витків потужність нагрівання підвищується, а робоча частота знижується, виходячи за межі допустимих частот перетворювача ЕТУ-250.

Серед розглянутих варіантів найменший перепад температури по тілу диска у 46 °С забезпечують варіанти № 4 і № 7 з кількістю витків внутрішньої та зовнішньої котушок відповідно 9 і 6 та 10 і 7. Незважаючи на деякі переваги варіанта № 7, а саме більш високі швидкість нагрівання та коефіцієнт потужності, з конструктивних міркувань, виходячи з жорсткості конструкції котушок після бандажування, перевагу слід надати варіанту № 4. У цьому випадку внутрішня котушка індуктора намотана мідною трубкою у три шари по три витки, а

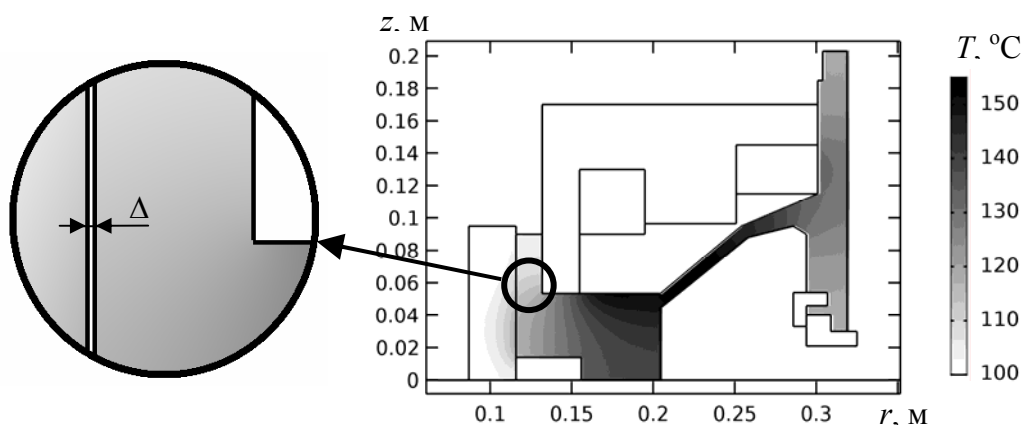


Рис. 4

зовнішня – у два шари по три витки. Розподіл температури на момент досягнення необхідного зазору та зміщення диска опорного катка для варіанта № 4 представлено на рис. 4.

Для зменшення перепаду температури у перерізі диска нижче 40 °С у цьому конструктивному варіанті достатньо збільшити робочу частоту перетворювача до 720 Гц. При цьому струм в індукторі складе 1050 А, потужність тепловиділення в диску впаде до 10,9 кВт, а тривалість нагрівання диска до моменту досягнення можливості роз'єднання деталей зросте до 360 с.

Висновки. 1. Запропоновано математичну модель для мультифізичного моделювання зв'язаних електромагнітних, теплових і внутрішньомеханічних процесів при індукційному нагріванні металевих деталей.

2. Продемонстровано використання зазначеної моделі для дослідження фізичних процесів у ремонтних операціях на прикладі демонтажу алюмінієвих дисків зі сталльної ступиці опорного катка гусеничного транспортного засобу. Для цього випадку запропоновано електромагнітну систему індукційного нагрівання, яка дає змогу виконати цю операцію з врахуванням технологічних обмежень. Визначено електромагнітні параметри такої системи.

1. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. Москва–Ленинград: Энергия, 1965. – 552 с.
2. Дзлийев С.В., Пищалев К.Е., Жнакин Д.М., Перевалов Ю.Ю. Высоочастотный индукционный нагрев при горячей посадке бандажных колец турбогенераторов и рабочих колес паровых турбин. *Индукционный нагрев*. 2012. № 2(20). С. 25–28.
3. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Ленинград: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
4. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. Ленинград: Энергия, 1974. 264 с.
5. Земан С.К., Владимиров С.Н., Крахмаль Е.В., Крахмаль А.В. Программный комплекс анализа температурных полей, наведенных индукционными источниками. *Доклады ТУСУРа*. 2005. № 3. С. 16–22.
6. Шидловський А.К., Жаркін А.Ф., Павлов В.Б., Новський В.О., Пазєєв А.Г., Палачов С.О., Павленко В.Є., Бойко П.С., Тугасенко Ю.П., Малахатка Д.О. Енергозберігаючі електротермічні установки для висоочастотного індукційного нагрівання. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. Київ, 2015. Вип. 41. С. 13–22.
7. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике: монография. Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. 305 с.
8. Шидловский А.К., Гориславец Ю.М., Глухенький А.И. Электромагнитные системы для дозирования жидких металлов: монография. Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2011. 210 с.
9. <https://www.comsol.ru/release/5.2>.
10. COMSOL multiphysics modeling and simulation software <http://www.comsol.com>.
11. Алюминий АК6 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/search.

УДК 621.365.5

А.К. Шидловский, акад. НАН Украины, **А.Ф. Жаркин**, чл.-корр. НАН Украины, **Ю.М. Гориславец**, докт. техн. наук, **В.А. Новский**, докт. техн. наук, **А.И. Глухенький**, канд. техн. наук, **А.И. Бондар**
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

Исследование индукционного нагрева соединенных с натяжением металлических деталей

Предложена математическая модель для численного исследования электромагнитных, тепловых и механических процессов при индукционном нагреве посаженных с натяжением металлических деталей. Электромагнитный процесс в модели описан дифференциальными уравнениями относительно комплексного векторного магнитного потенциала при заданном напряжении, что позволяет непосредственно согласовать индукционную систему с источником питания. Тепловая задача сформулирована в виде нестационарного уравнения теплопроводности с внутренними источниками тепла от вихревых токов, наведенных в материале деталей. Внутренний механический процесс представлен дифференциальным уравнением механического равновесия, решение которого позволяет определить термомеханические напряжения и деформации при нагревании. На примере демонтажа алюминиевых дисков со стальной ступицы опорного катка гусеничного транспортного средства исследован термомеханический процесс при нагревании деталей с помощью предложенной электромагнитной системы, состоящей из двух катушек и общего магнитопровода. Библи. 11, рис. 4, таблица.

Ключевые слова: индукционный нагрев, математическая модель, мультифизическое моделирование, электромагнитная система, демонтаж посаженных с натяжением металлических деталей.

A.K. Shydlovskiy, A.F. Zharkin, Y.M. Goryslavets, V.O. Novskiy, O.I. Glukhenkiy, O.I. Bondar

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

Investigation of induction heating of connected with tension metal details

Mathematical model for numerical investigation of electromagnetic, heat and mechanical processes during induction heating of planted with tension metal details was proposed. Electromagnetic process in model is described by differential equations in terms of complex vector magnetic potential at applied voltage, that allow to coordinate directly induction system with power source. Heat problem is formulated as nonstationary equation of heat conductance with internal sources of heat from eddy currents, induced in material of details. Internally mechanical process presented by differential equation of mechanical equilibrium, solving of which allow determine thermomechanical tensions and deformations during heating. As an example the process of dismantling of aluminum disks from steel hub of the support roller of crawler vehicle have been investigated, namely the process of heating of details with the help of proposed electromagnetic system, that consist of two coils and common magnetic conductor. References 11, figures 4, table.

Key words: induction heating, mathematical model, multiphysical modeling, electromagnetic system, dismantling of planted with tension details.

Надійшла 14.02.2018

Received 14.02.2018

УДК 620.179:621.373.5

ОБРОБКА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІМПУЛЬСНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ ПРИ СИЛЬНОМУ СКІН-ЕФЕКТІ

Ю.М. Васецький¹, докт. техн. наук, **І.П. Кондратенко²**, чл.-кор. НАН України,

О.М. Пашин³, канд. техн. наук, **К.К. Дзюба⁴**, асп.

1, 2, 4 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

yuriy.vasetsky@gmail.com

3 – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,

вул. Малеви́ча, 11, Київ-150, 03150, Україна

Розглянуто можливість застосування безконтактного індукційного способу введення імпульсного струму в алюмінієвий лист для обробки зварного шва, при якому завдяки дії магнітного тиску в матеріалі виникають механічні напруження і протікають індуквані струми високої густини. Отримано оцінки необхідної величини струму індуктора, розподілу магнітного тиску і густини індукваного струму по ширині листа з використанням розрахункової моделі прямолінійного струмового провідника кругового перерізу. Встановлено, що при сильному скін-ефекті магнітний тиск досягає межі плинності лише за умови надвисокої густини струмового контура. Обґрунтовано доцільність застосування імпульсного електромагнітного поля для обробки шва струмами високої густини або використання комбінованого способу з одночасним застосуванням вказаного та електродинамічного способів впливу на шов. Бібл. 9, рис. 8.

Ключові слова: електромагнітне поле, імпульсний електричний струм, сильний скін-ефект, зварний шов, металева штаба.

Створення та впровадження якісно нових технологічних процесів у галузі металообробки з метою підвищення міцності, корозійної стійкості, експлуатаційних характеристик зварних конструкцій вимагає пошуку нових ефективних способів обробки металів і сплавів. На сьогодні відомим є факт суттєвого позитивного впливу імпульсного електричного струму (ІЕС) та імпульсного електромагнітного поля (ІЕМП) на механічні властивості металевих матеріалів [1]. Останнім часом створено низку високопродуктивних технологічних методів обробки конструкційних матеріалів із застосуванням впливу ІЕС та ІЕМП, які дають змогу інтенсифікувати процес обробки та дають більш високі результати по відношенню до традиційної термообробки [2], наприклад, підвищення пластичності більш ніж у три рази. Крім того, перспективним напрямком застосування ІЕС та ІЕМП є створення значних електродинамічних зусиль у металі, що призводить до появи необхідних для впливу на зварний шов