УДК 539.3: 538.3: 536.21: 518.12: 681.142.2

Гачкевич О. Р., д. ф.-м. н., проф.,
Дробенко Б. Д., д. ф.-м. н., с. н. с.

Комп'ютерне моделювання термомеханічних процесів в електропровідних тілах за електромагнітних навантажень

Подано результати досліджень термомеханічних процесів в електропровідних тілах за квазіусталених електромагнітних навантажень з урахуванням феромагнітних властивостей та термочутливості матеріалів, а також пружно-пластичного характеру їх деформування. Показано, що шляхом вибору частоти електричного струму і умов подальшого охолодження тіл після зняття дії струму можна формувати близькі до заданих залишкові напруження у тілах.

Ключові слова: зв'язані поля, залишкові напруження, індукційна термообробка.

Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України
79060, м. Львів, вул. Наукова 3-б
e-mail: drobenko@ukr.net, dept13@iapmm.lviv.ua

O. R. Hachkevych, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,
B. D. Drobenko, Dr. Sci. (Phys.-Math.), sen. res.

Computer simulation of thermomechanical processes in electrically conductive solids subjected to electromagnetic loading

Results of the research of thermomechanical processes in electrically conductive solids subjected to quasi-steady electromagnetic loading considering elastic–plastic deformations, ferromagnetic properties and temperature sensitivity of materials are given. There are shown that by proper selection of electric current frequency as well as cooling conditions after removing the current action the predefined level of residual stresses can be obtained.

Key Words: coupled fields, residual stresses, induction heat treatment.

Pidstryhach Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics of NASU
79060, L'viv, Naukova str., 3-b
e-mail: drobenko@ukr.net, dept13@iapmm.lviv.ua

Для підвищення міцності й надійності виробів з електропровідних матеріалів у сучасних технологіях термообробки широко використовують електромагнітні поля (ЕМП). Відоме застосування такої обробки при гартуванні, лютуванні, зварюванні, очищенні, дегазації, сушінні, легуванні, нанесенні зміцнювальних покриттів та ін.

Дія ЕМП на електропровідне тіло спричиняє протікання в ньому взаємозв'язаних електромагнітних, теплових і механічних процесів, які істотно впливають на функціональні параметри і міцність. Тому для побудови раціональних режимів обробки з використанням ЕМП і оцінки функціональної здатності виробів з електромагнітних матеріалів важливою є наявність математичних моделей і методів дослідження у взаємодії процесів електропровідності, теплопровідності й деформування у твердих тілах залежно від їх електропровідності і здатності до намагнічування.

Загальні підходи до побудови термомеханічних моделей суцільного середовища, які враховують взаємодію полів різної фізичної природи, достатньо повно висвітлені в літературі. На їх основі запропоновано численні конкретні моделі опису механічної поведінки електропровідних тіл за дії зовнішнього ЕМП. У переважній більшості праць (див., напр., огляди [1-3]), присвячених кількісному опису термомеханічних процесів в електропровідних тілах за термообробки з використанням ЕМП, характеристики матеріалів приймають незалежними від температури, а процеси деформування – пружними. Застосування таких моделей у випадках, коли тіла нагрівають до підвищених температур, може призводити до істотних похибок в оцінках параметрів стану тіл [3].

У працях [4-9] запропоновано моделі, які адекватніше описують термомеханічні процеси в нелінійних електропровідних тілах за індукційного нагрівання. Зокрема, математична модель [8, 9] розроблена на основі загальної теорії взаємодії ЕМП та матеріального континууму (в якій вплив поля враховано через об'ємні тепловиділення, як джоулеві, так і пов'язані з перемагнічуванням і переполяризацією, та пондеромоторні сили), зв'язаних рівнянь теплопровідності та Максвелла для тіл з різними електропровідністю і здатністю до намагнічування та поляризації (з феноменологічними співвідношеннями, що враховують нелінійні зв'язки між індукціями і напруженостями відповідно електричного й магнітного полів) за температурно залежних електро- і теплофізичних характеристик, а також теорії неізотермічної тер-

© О. Р. Гачкевич, Б. Д. Дробенко, 2013

мопружно-пластичності у геометрично лінійному наближенні, рівняння якої відповідають фізичним особливостям процесів нагрівання і охолодження термочутливих, здатних до пружно-пластичного деформування матеріалів [10].

З використанням числових підходів розроблено методику розв'язування сформульованої на цій основі задачі електро-магніто-термо-пружно-пластичності, а також відповідне програмне забезпечення для комп'ютерного моделювання термомеханічних процесів в електропровідних тілах за комплексного навантаження [3]. Наявність такого забезпечення дає змогу у стислі терміни визначити раціональні значення параметрів технологічних процесів термообробки виробів з електропровідних матеріалів з метою отримати в них необхідні функціональні властивості, а також проаналізувати механічну поведінку того чи іншого виробу за комплексного навантаження, оцінити його міцність, структуру, рівень залишкових напружень тощо. Це значно пришвидшує виготовлення виробів як на етапі прийняття і оцінки конструктивних рішень, так і під час виробничого циклу. При цьому різко зменшується кількість натурних експериментів, оскільки перевіряють лише раціональні проекти, отримані в результаті комп'ютерного моделювання.

Мета даної роботи – з використанням розробленого програмного забезпечення провести дослідження режимів високотемпературної індукційної обробки виробів з електропровідних матеріалів для формування в них залишкових напружень, близьких до заданих. Керування при цьому можна здійснювати умовами теплообміну із зовнішнім середовищем, геометричними розмірами і розташуванням джерел струму в зовнішньому середовищі, частотою та значенням амплітуди електричного струму.

Вплив умов охолодження

Під час термообробки тіло $V = \{r \le R, |z| \le L\}$ нагрівають за допомогою ЕМП, яке індукує заданий у зовнішньому середовищі струм густиною

$$j_\varphi^{(0)} = J_0 \delta(r - R_i) \cdot (S_-(z + L_i) - S_+(z - L_i)) \sin(2\pi \nu_\omega t),$$

де δ, S_-, S_+ – δ- та S-функції (r, φ, z – циліндричні координати); циліндричною поверхнею радіуса R_i і завдовжки $2L_i$ (що моделює індуктор) тече струм з частотою ν_ω і амплітудою J_0. У початковий момент часу ЕМП у тілі й середовищі відсутнє. Заданий початковий розподіл T_0 температури у тілі, яке перебуває за умов конвективного теплообміну (з коефіцієнтом β) із зовнішнім середовищем, температура якого T_s. Коли температура у перерізі $z = 0$ циліндра на глибині h_g від поверхні досягає T_g, струм $j_\varphi^{(0)}$ вимикають, і тіло охолоджується через теплообмін із середовищем. Формулювання і методику розв'язування такої задачі досить повно висвітлено у працях [3, 8, 9].

Досліджено залежність залишкових напружень у циліндрі для різних способів охолодження, які моделювали за допомогою температурно залежного коефіцієнта тепловіддачі. Моделювання виконано для циліндра із магнітном'якої феромагнітної сталі Ст. 30 [11-14] за таких значень числових параметрів:

$$R = 0{,}01 \text{ м};\ L = 0{,}01 \text{ м};\ R_i = 0{,}012 \text{ м};\ L_i = 1{,}05 \cdot L;$$
$$J_0 = 1 \text{ МА/м};\ \nu_\omega = 8 \text{ кГц};$$
$$T_g = 970°\text{C};\ h_g = 0{,}0015 \text{ м};$$
$$T_0 = T_S = 20\,°\text{C};\ \beta = 13 \text{ Вт/(м}^2\text{К)} \text{ – за нагрівання.}$$

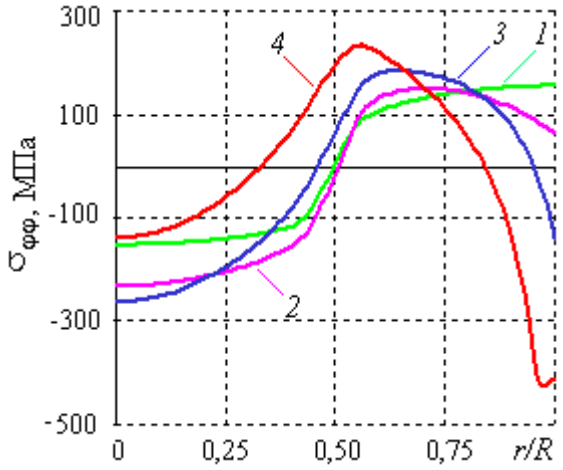

Рис. 1. Кільцеві напруження у циліндрі за різних способів охолодження

На рис. 1 показано розподіли залишкових колових $\sigma_{\varphi\varphi}$ напружень уздовж радіуса циліндра після повного його охолодження за чотирьох різних залежностей коефіцієнта теплообміну від температури (за допомогою яких моделюють часто використовувані на практиці способи охолодження): тіло повільно охолоджується з тим же коефіцієнтом тепловіддачі, що й за нагрівання (крива *1* – природне охолодження на повітрі); тіло охолоджується інтенсивними потоками повітря (*2*), оливи (*3*) і води (*4*) (температурні залежності коефіцієнта тепловіддачі за охолодження потоками води (β_b), оливи (β_0) і повітря (β_π) подано у праці [14]).

Зазначимо, що швидкість охолодження поверхні циліндра не є монотонна. Під час використання потоків води, наприклад, максимальний відбір тепла спостерігають на початку охолодження і в околі температур 300…200°C. Тому обчислення зі сталими (усередненими) коефіцієнтами теплообміну можуть призводити до невірних оцінок залишкових напружень у тілі. Зокрема, у розглянутих випадках різниця в значеннях залишкових напружень, які отримані за врахування температурної залежності коефіцієнта теплообміну і без такого врахування, становить близько 40%.

Отже, шляхом вибору умов охолодження можна істотно регулювати як рівень, так і характер розподілу залишкових напружень у циліндрі, що дає можливість отримувати раціональні режими його термообробки для формування бажаних рівня і розподілу залишкових напружень.

Вплив частоти струму

Аналогічно досліджено вплив частоти струму на етапі нагрівання з допомогою ЕМП на залишкові напруження у циліндрі $V=\{R_1 \le r \le R_2, |z| \le L\}$ з тієї ж сталі. Обчислювальний експеримент проведено за параметрів:

R_1=0,1 м; R_2=0,11 м; L=0,2 м; R_i=0,112 м;
L_i=0,21 м; $J_0=1$ МА/м;
$\beta=\beta_b(T)$ і $\beta=\beta_0(T)$ – за охолодження.

Інші параметри – такі ж, як і у попередній задачі.

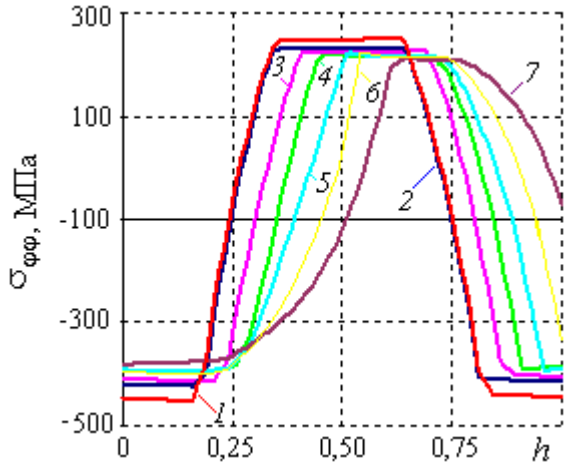

Рис. 2. Залишкові кільцеві напруження у циліндрі за різних частот струму на етапі нагрівання

На рис. 2 подано розподіли колових залишкових напружень за товщиною циліндра у центральній його частині за нагрівання струмом відповідно з частотами $\nu_\omega=0{,}05$ (крива *1*); 0,3 (*2*); 0,5 (*3*); 0,8 (*4*); 1,6 (*5*); 3 (*6*); 8 (*7*) кГц після повного охолодження інтенсивним водяним потоком з обох поверхонь ($h=(r-R_1)/(R_2-R_1)$).

На рис. 3 для цих же випадків показано розподіли температури у циліндрі в момент вимкнення струму. Як бачимо, під час нагрівання струмом із частотою $\nu_\omega \le 0{,}5$ кГц тіло до вимкнення індуктора встигає рівномірно прогрітись за товщиною. Як наслідок за його охолодження з обох поверхонь отримуємо в кінцевому стані практично однакові зони стискальних залишкових напружень у приповерхневих шарах.

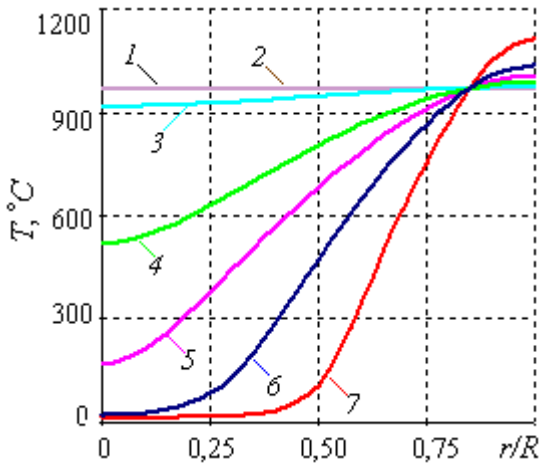

Рис. 3. Розподіли температури у циліндрі у момент досягнення необхідної глибини прогрівання

На рис. 4 лінії *1–3* описують зміни температури зовнішньої (суцільні лінії) та внутрішньої (штрихові) поверхонь циліндра в часі за нагрівання струмами відповідно з частотами $\nu_\omega=0{,}3$ (*1*); 0,5 (*2*); 0,8 (*3*) кГц і двостороннього охолодження інтенсивними потоками води.

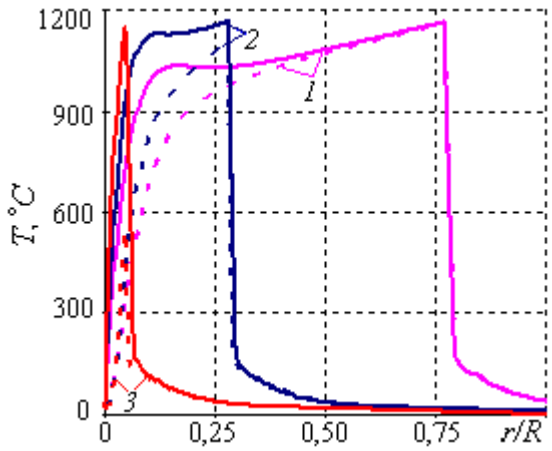

Рис. 4. Зміни температури поверхонь циліндра за нагрівання струмами з різними частотами

За температур вищих точки Кюрі (770°C) з втратою матеріалом феромагнітних властивостей нагрівання тіла сповільнюється (за незмінного струму). За малих частот (за відсутності належної теплоізоляції) нагрівання зовнішньої поверхні може зупинитись і навіть спадати певний час, необхідний для прогрівання тіла по товщині, що ілюструє рис. 5. На ньому кривими *1–5* проілюстровано зміни температури у перерізі $z = 0$ зовнішньої поверхні, точок на віддалі 2, 4 і 6 мм від неї та внутрішньої поверхні циліндра відповідно.

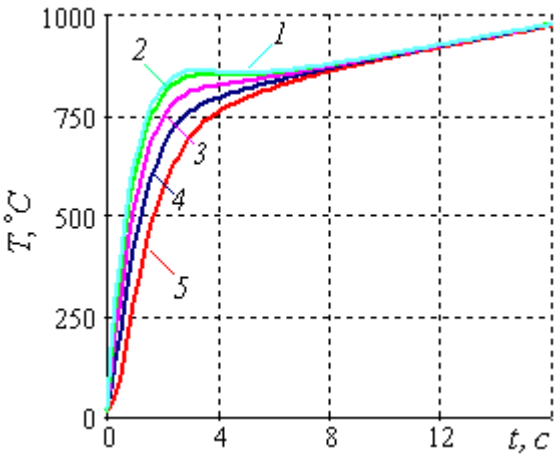

Рис. 5. Зміни температури в різних точках тіла за нагрівання струмом з частотою $\nu_\omega = 0{,}3$ кГц

Запропонована в [3] методика математичного моделювання термомеханічних процесів в електропровідних тілах з різними здатностями до намагнічування і поляризації за електромагнітних навантажень дає змогу адекватніше прогнозувати поведінку електропровідних тіл у широкому температурному діапазоні. Розроблене на цій основі програмне забезпечення можна використовувати для побудови раціональних режимів індукційної обробки виробів з електропровідних матеріалів за різноманітними критеріями, зокрема, мінімізації часу обробки чи відхилення напружень у виробі від деяких заданих тощо.

Список використаних джерел

1. *Podstryhach Ya. S., Burak Ya. Yo., Gachkevich A. R., Cherniavskaya L. V.* Thermoelasticity of electrically conductive solids. – Kiev: Naukova Dumka, 1977. – 248 p. (in Russian).
2. *Gaczkiewicz A., Kasperski Z.* Models and mathematical methods in boundary value problems for the thermomechanics of electrically conducting solids. – Opole: Politechnika Opolska, 1999. – 368 p. (in Polish).
3. *Modelling* and optimization in thermomechanics of electroconductive heterogeneous solids / Edit. Ya. J. Burak and R. M. Kushnir. V.4: Thermomechanics of magnetizable electrically conductive thermosensitive solid / O. R. Hachkevych., B. D. Drobenko. – Lviv: SPOLOM, 2010. – 260 p. (in Ukrainian).
4. *A numerical* model for induction heating processes coupling electromagnetism and thermomechanics / F. Bay, V. Labbe, Y. Favennec, J. L. Chenot // Int. J. for Numerical Methods in Engineering. – 2003. – **58**, № 6. – P. 839-867.
5. *Pantelyat I. G., Zgraja J.* Inductive heating of large steel disks: coupled electromagnetic, thermal and mechanical simulation // Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 1999. – **10**. – P. 185-192.
6. *Induction* heat treatment of a ISO C45 steel bar: Experimental and numerical analysis / I. Magnabosco. P. Ferro, A. Tiziani, F. Bonollo // Computational Materials Science. – 2006. – **35**. – P. 98-106.
7. *Kim D. H., Kim B. M., Kang C. G.* Die life considering the deviation of the preheating billet temperature in hot forging process // Finite Elements in Analysis and Design. – 2005. – **41**. – P. 1255-1269.
8. *Drobenko B., Hachkevych O., Kournyts'kyi T.* A mathematical simulation of high temperature induction heating of electroconductive solids // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 2007. – **50**. – P. 616-624.
9. *Drobenko B., Hachkevych O., Kournyts'kyi T.* Thermomechanical behaviour of polarizable and magnetizable electroconductive solids subjected to induction heating // J. of Eng. Mathematics. – 2008. – **61**, № 2-4. – P. 249-269.
10. *Allen D. H. Heisler W. E.* A theory for analysis of thermoplastic materials // Computers & Structures. – 1981. – V. 13. – P. 129-135.
11. *Preobrazensky A. A.* Magnetic materials and elements. – Moscow: Wyshaja Shkola, 1976. – 336 p. (in Russian).
12. *Turowski J.* Technical electrodynamics. – Warsaw: WNT, 1993. – 462 p. (In Polish).
13. *Tables* of physical values. Reference book / I. K. Kikoin (Ed.). – Moscow: Atomizdat, 1976. –1008 p. (in Russian).
14. *Golovin H. F., Zamiatin M. M.* High frequency thermal treatment. – Leningrad: Mashinostrojenie, 1990. – 240 p. (in Russian).

Надійшла до редколегії 31.03.13