

## Оптимізація режимів високотемпературної індукційної обробки нелінійних електропровідних тіл

О. Р. Гачкевич<sup>а</sup>, Б. Д. Дробенко<sup>а,1</sup>, П. І. Ванкевич<sup>б</sup>, М. Ю. Яковлев<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів, Україна

<sup>б</sup> Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана П. Сагайдачного, Львів, Україна

<sup>1</sup> drobenko@ukr.net

*На основі розробленої математичної моделі опису термомеханічних процесів в електропровідних тілах, що мають різну здатність до намагнічування та поляризації за умов дії електромагнітного поля, запропоновано підхід до комп'ютерного моделювання електромагнітних, теплових і механічних полів у феромагнітних тілах. Наведено результати досліджень режимів високотемпературної індукційної обробки тіл із різних феромагнітних матеріалів. Показано, що шляхом вибору частоти електричного струму на етапі нагрівання і умов подальшого охолодження можна формувати в тілах залишкові напруження, близькі до заданих, або зменшувати тривалість процесу термообробки виробів за обмежень на напруження.*

**Ключові слова:** міцність, зв'язані поля, метод скінченних елементів.

**Вступ.** Для підвищення міцності та надійності елементів машинобудівних конструкцій у сучасних технологіях термообробки широко використовуються електромагнітні поля (ЕМП). Безконтактний спосіб передачі енергії до тіла, висока швидкість нагрівання, відносно низьке енергоспоживання, локальний характер дії поля на певні підобласті тіла та високі продуктивність і ступінь автоматизації зумовлюють перспективність використання таких технологій. Відомо застосування такої обробки виробів 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 важливим є наявність математичних моделей і методів дослідження у взаємодії процесів електропровідності, теплопровідності та деформування у твердих електропровідних тілах у залежності від їх електропровідності і здатності до намагнічування й поляризації.

Загальні підходи до побудови термомеханічних моделей суцільного середовища, які враховують взаємодію полів, що мають різну фізичну природу, достатньо повно висвітлено в літературних джерелах. На їх основі запропоновано чисельні конкретні моделі опису механічної поведінки електропровідних тіл за дії зовнішнього ЕМП. У переважній більшості робіт [1–4], присвячених кількісному опису термомеханічних процесів в електропровідних тілах за термообробки з використанням ЕМП, характеристики матеріалів приймаються постійними (незалежними від температури), а процеси деформування розглядаються у пружному наближенні. Застосування таких моделей у випадках, коли тіла нагрівають до підвищених температур, може призводити до істотних похибок в оцінках параметрів стану тіл.

У роботах [5–10] запропоновано моделі, які адекватніше описують термомеханічні процеси в нелінійних електропровідних тілах за індукційного нагрівання. Зокрема, математичну модель [9, 10] розроблено на основі загальної теорії взаємодії ЕМП

та матеріального континууму (вплив поля враховано через об'ємні тепловиділення – як джоулеві, так і пов'язані з перемагнічуванням і переполаризацією – та пондеромоторні сили), зв'язаних рівнянь теплопровідності та Максвелла для тіл із різними електропровідністю і здатністю до намагнічування і поляризації (із феноменологічними співвідношеннями, що враховують нелінійні зв'язки між індукцією і напруженістю відповідно електричного й магнітного полів) за температурозалежних електро- і теплофізичних характеристик, а також теорії неізотермічної термопружно-пластичності з ізотропно-кінематичним зміцненням у геометрично лінійному наближенні. Рівняння останньої відповідають фізичним особливостям процесів нагрівання і охолодження термочутливих анізотропно зміцнюваних матеріалів, здатних до пружно-пластичного деформування [11].

Із використанням ефективних числових підходів розроблено методику розв'язку сформульованої на цій основі комплексної істотно нелінійної зв'язаної задачі електромагніто-термопружно-пластичності, а також відповідне програмне забезпечення для комп'ютерного моделювання термомеханічних процесів у нелінійних електропровідних тілах за дії комплексного навантаження [4]. Наявність такого забезпечення дозволяє у стислі терміни визначити раціональні значення параметрів технологічних процесів термообробки виробів з електропровідних матеріалів із метою отримання необхідних функціональних властивостей, а також проаналізувати механічну поведінку того чи іншого виробу за умов комплексного навантаження та 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 достатньо вартісних натурних експериментів, оскільки перевіряються лише раціональні проекти, отримані в результаті комп'ютерного моделювання.

У даній роботі за допомогою розробленого програмного забезпечення досліджуються режими високотемпературної індукційної обробки виробів з електропровідних матеріалів із метою формування в них залишкових напружень, близьких до заданих, або зменшення тривалості їх термообробки за обмежень на напруження. Провідними при цьому є умови теплообміну із зовнішнім середовищем, геометричні розміри і розташування джерел струму в зовнішньому середовищі, а також частота та значення амплітуди електричного струму.

**Вплив умов охолодження на залишкові напруження у циліндрі.** Під час термообробки тіло  $V = \{r \leq R, |z| \leq L\}$  нагрівають за допомогою ЕМП, яке індукуює заданий у зовнішньому середовищі струм густиною

$$j_{\varphi}^{(0)} = J_0 \delta(r - R_i) (S_-(z + L_i) - S_+(z - L_i)) \sin(2\pi \nu_{\omega} t), \quad (1)$$

де  $\delta$ ,  $S_-$ ,  $S_+$  – відповідно  $\delta$ - та  $S$ -функції;  $r$ ,  $\varphi$ ,  $z$  – циліндричні координати;  $R_i$  – радіус циліндричної поверхні;  $2L_i$  – її довжина.

По циліндричній поверхні радіусом  $R_i$  і довжиною  $2L_i$ , що моделює індуктор, тече струм частотою  $\nu_{\omega}$  і амплітудою  $J_0$  (рис. 1). У початковий момент часу ЕМП у тілі й середовищі відсутнє. Задано початковий розподіл  $T_0$  температури у тілі, яке перебуває за умов конвективного теплообміну (із коефіцієнтом  $\beta$ ) із зовнішнім середовищем, температура якого  $T_s$ . Якщо температура у перерізі  $z = 0$  циліндра на глибині  $h_g$  від поверхні сягає  $T_g$ , струм (1) вимикають, і тіло охолоджується через теплообмін із середовищем. Формулювання і методику розв'язку такої задачі досить повно висвітлено у роботах [9, 10].

Досліджується залежність залишкових напружень у циліндрі за різних умов охолодження, які моделювали за допомогою температурно-залежного коефіцієнта тепловіддачі. Моделювання виконано для циліндра з магнітно-м'якої феромагнітної

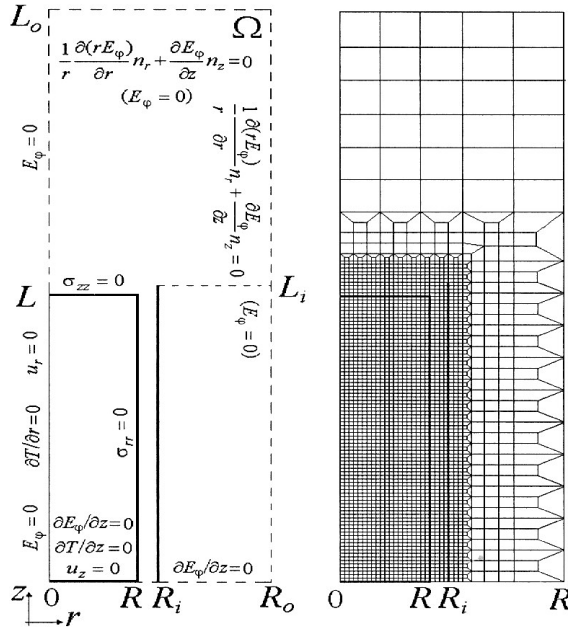


Рис. 1. Розрахункова область, крайові умови і типовий скінченноелементний поділ області.

сталі 30 [12–15] за таких числових параметрів:  $R = 0,01$  м;  $L = 0,01$  м;  $R_i = 0,012$  м;  $L_i = 1,05L$ ;  $J_0 = 1$  МА/м;  $\nu_\omega = 8$  кГц;  $T_g = 970^\circ\text{C}$ ;  $h_g = 0,0015$  м;  $T_0 = T_s = 20^\circ\text{C}$ ;  $\beta = 13$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) – під час нагрівання.

На рис. 2,а показано розподіл колових залишкових напружень  $\sigma_{\varphi\varphi}$  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. (Температурні залежності коефіцієнта тепловіддачі за охолодження потоками води ( $\beta_b$ ), оливи ( $\beta_0$ ) і повітря ( $\beta_\pi$ ) наведено у роботі [16].) Аналогічний розподіл отримано також для осевих напружень  $\sigma_{zz}$ .

Зазначимо, що швидкість охолодження поверхні циліндра не є монотонною. Під час використання потоку води, наприклад, максимальний відбір тепла спостерігається на початку охолодження і в діапазоні 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 отримано за врахування температурної залежності коефіцієнта теплообміну та без такого врахування, становить близько 40%.

Таким чином, шляхом вибору умов охолодження можна істотно регулювати як рівень, так і характер розподілу залишкових напружень у циліндрі. Це дозволяє отримувати раціональні режими його термообробки для формування необхідних рівня і розподілу залишкових напружень.

**Раціональні за залишковими напруженнями режими термообробки.** Аналогічно досліджено вплив частоти струму на етапі нагрівання за допомогою ЕМП на залишкові напруження у циліндрі  $V = \{R_1 \leq r \leq R_2, |z| \leq L\}$  з тієї ж сталі. Обчислювальний експеримент проводили за таких 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 (під час охолодження  $\beta = \beta_b(T)$  і  $\beta = \beta_0(T)$ , всі інші параметри відповідають вищенаведеним).

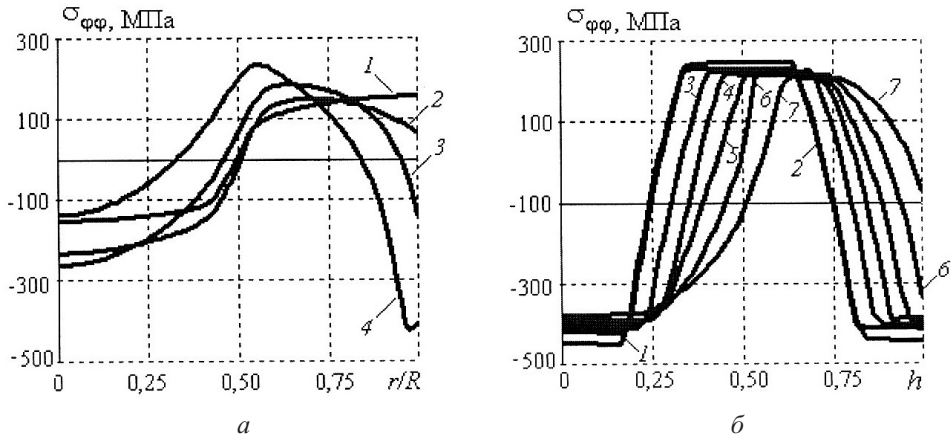


Рис. 2. Залишкові напруження в циліндрі після термообробки за різних умов охолодження (а) та частот струму на етапі нагрівання (б): а – 1 – природне охолодження на повітрі; 2, 3, 4 – охолодження інтенсивними потоками повітря, оливи і води відповідно; б – 1 –  $\nu_{\omega} = 0,05$  кГц; 2 –  $\nu_{\omega} = 0,3$  кГц; 3 –  $\nu_{\omega} = 0,5$  кГц; 4 –  $\nu_{\omega} = 0,8$  кГц; 5 –  $\nu_{\omega} = 1,6$  кГц; 6 –  $\nu_{\omega} = 3$  кГц; 7 –  $\nu_{\omega} = 8$  кГц.

На рис. 2,б наведено розподіл колових залишкових напружень за товщиною циліндра в центральній його частині за нагрівання струмом різної частоти після повного охолодження інтенсивним водяним потоком зовнішньої і внутрішньої поверхонь ( $h = (r - R_1) / (R_2 - R_1)$ ). Під час нагрівання струмом із частотою  $\nu_{\omega} \leq 0,5$  кГц тіло до вимкнення індуктора встигає рівномірно прогрітись за товщиною. Як наслідок, при охолодженні цих поверхонь отримуємо практично однакові зони стискальних залишкових напружень у приповерхневих шарах.

Інтенсивне охолодження однієї поверхні порожнистого циліндра призводить до виникнення на ній стискальних напружень і розтяжних – на іншій. Це ілюструє рис. 3, де показано розподіл колових залишкових напружень у циліндрі, охолоджену інтенсивним водяним потоком ззовні (крива 1), зсередини (крива 2) і з обох поверхонь (крива 3) та потоком оливи з обох поверхонь (крива 4) за нагрівання струмом із частотою  $\nu_{\omega} = 0,5$  кГц.

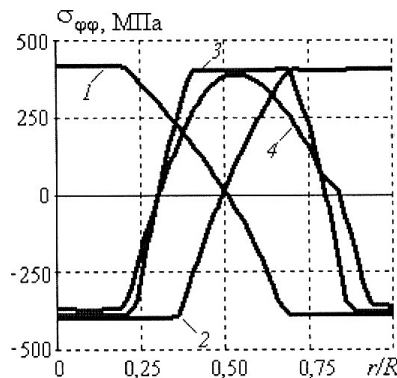


Рис. 3. Залишкові напруження у порожнистому циліндрі за різних умов охолодження.

На рис. 4,а показано зміну температури на зовнішній (суцільні лінії) та внутрішній (штрихові лінії) поверхнях циліндра в часі за нагрівання струмом різної частоти і двостороннього охолодження інтенсивним потоком води.

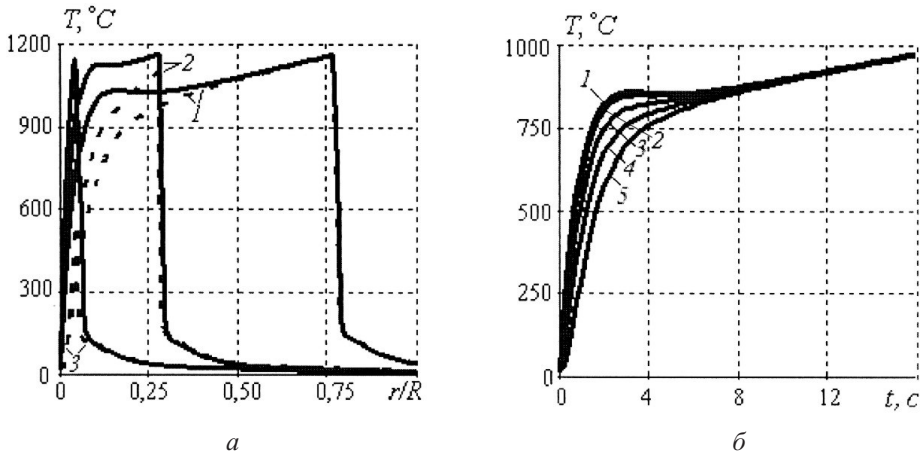


Рис. 4. Зміна температури на внутрішній і зовнішній поверхнях циліндра за нагрівання струмом різної частоти (а) та в перерізі  $z = 0$  зовнішньої поверхні (1) в різних точках тіла на відстані 2 (2), 4 (3), 6 мм (4) від неї і внутрішньої поверхні (5) за нагрівання струмом частотою  $\nu_\omega = 0,3$  кГц (б). (а: 1 -  $\nu_\omega = 0,3$  кГц; 2 -  $\nu_\omega = 0,5$  кГц; 3 -  $\nu_\omega = 0,8$  кГц.)

За температур, вищих за точку Кюрі ( $770^\circ\text{C}$ ), з втрапою 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 (рис. 4, б).

Як бачимо, температура на зовнішній поверхні за даних умов нагрівання з моменту часу  $t \approx 3$  с перестає зростати, а з моменту  $t \approx 3,96$  с навіть починає спадати доти, доки внутрішня поверхня не нагріється до температури Кюрі.

Зазначимо, що поверхнева область тіла нагрівається до температур  $T \geq T_g$  при  $\nu_\omega = 0,8$  кГц за 1 с, тоді як для  $\nu_\omega = 0,5$  і  $0,3$  кГц – відповідно за 5,6 і 15,5 с, тобто на нагрівання тіла струмом частотою  $\nu_\omega = 0,3$  кГц витрачаємо майже втричі більше часу, ніж при  $\nu_\omega = 0,5$  кГц (за незначної різниці у залишкових напруженнях), і у 15 разів більше, ніж при  $\nu_\omega = 0,8$  кГц.

Таким чином, шляхом вибору частоти струму та умов охолодження можна регулювати в досить широких межах як рівень, так і характер розподілу залишкових напружень у тілі, а також мінімізувати тривалість нагрівання за обмежень на напруження у виробі, що проілюстровано в подальшому на прикладі термообробки циліндра із магнітно-твердого феромагнітного матеріалу.

**Мінімізація часу термообробки циліндра за обмежень на напруження.** За допомогою комп'ютерного моделювання визначено частоту струму (530 Гц) на етапі нагрівання і коефіцієнт тепловіддачі при охолодженні після вимкнення струму ( $655 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ), за яких круговий суцільний циліндр із магнітно-твердого феромагнітного сплаву ЮНДК24 [17] вдається якнайшвидше нагріти до температури  $T_g = 1050^\circ\text{C}$  і потім охолодити так, щоб максимальні напруження, які виникають у процесі термообробки, не перевищували допустимих ( $[\sigma] = 100 \text{ МПа}$ ).

**Урахування геометрії індуктора.** Розглянутий підхід до моделювання зовнішнього джерела змінного струму (індуктора) істотно спрощує процедуру побудови скінченноелементного поділу області і відповідно скорочує час розв'язку задачі. Однак за такого ідеалізованого способу моделювання питання задавання амплітуди  $J_0$  у співвідношенні (1) залишається відкритим. Значення  $J_0$  можна визначити, якщо розглянути реальну геометрію провідника, по якому тече струм. Зокрема, під час моделювання процесів індукційної обробки циліндра амплітуду  $J_0$  для ідеалізо-

ваного індуктора у вигляді циліндричної поверхні можна визначити з обчислювального експерименту з урахуванням геометрії провідника радіуса  $R_p$  (рис. 5; з умов симетрії розглянуто лише фрагмент області).

Реальний струм, який тече по провіднику, і геометричні розміри провідника завжди відомі. Тому легко обчислити амплітуду густини струму у ньому і параметри, які описують ЕМП хоча б для декількох періодів електромагнітної хвилі на скінченноелементному поділі, показаному на рис. 5. Далі можна визначити амплітуду  $J_0$  для виразу (1) за умови збігу напруженості магнітного й електричного полів на поверхні циліндра (при  $r = R$ ) для обох випадків (за врахування реальної геометрії провідника та його ідеалізованого подання у вигляді циліндричної поверхні).

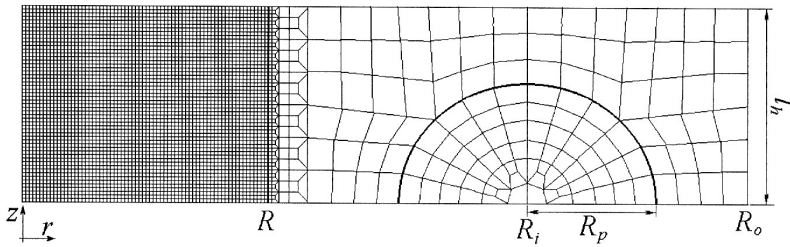


Рис. 5. Скінченноелементний поділ фрагменту тіла, провідника і навколишнього середовища.

Згідно з даними обчислювального експерименту отримано практично ідеальний збіг параметрів ЕМП, температури і напруженого стану для обох випадків за такого вибору  $J_0$ . Додатково, враховуючи реальну геометрію провідника, можна дослідити вплив геометричних параметрів  $R_p$ ,  $l_h$ ,  $R_i - R$  на розподіл електромагнітних, температурних і механічних полів у циліндрі.

## Висновки

1. Запропонована методика комп'ютерного моделювання термомеханічних процесів в електропровідних тілах за високотемпературної індукційної обробки дозволяє адекватніше прогнозувати реальну поведінку електропровідних тіл, у тому числі складної геометричної конфігурації, у широкому температурному діапазоні і враховувати її під час автоматизації термообробки.

2. Розроблене програмне забезпечення можна використати для побудови раціональних режимів індукційної обробки виробів з електропровідних матеріалів, що мають різну здатність до намагнічування і поляризації, за різноманітними критеріями, зокрема мінімізації часу обробки (енергетичні витрати) за обмежень на напружений стан, відхилення напружень у виробі від деяких заданих, рівномірності нагрівання виробів чи певних їх підобластей тощо.

## Резюме

На основе разработанной математической модели описания термомеханических процессов в электропроводных телах с разной способностью к намагничиванию и поляризации под воздействием электромагнитного поля предложен подход к компьютерному моделированию электромагнитных, тепловых и механических полей в ферромагнитных телах. Приведены результаты исследований режимов высокотемпературной индукционной обработки тел из различных ферромагнитных материалов. Показано, что путем выбора частоты электрического тока на этапе нагрева и условий дальнейшего охлаждения можно формировать в телах остаточные напряжения, близ-

кие к заданным, или уменьшать продолжительность процесса термообработки изделий при ограничениях на напряжения.

1. *Подстригач Я. С., Бурак Я. И., Гачкевич А. Р., Чернявская Л. В.* Термоупругость электропроводных тел. – Киев: Наук. думка, 1977. – 248 с.
2. *Gaczkiewicz A., Kasperski Z.* Modele i Metody Matematyczne w Zagadnieniach Termomechaniki Ciał Przewodzących. – Opole: Politech. Opolska, 1999. – 367 s.
3. *Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я. Й. Бурака, Р. М. Кушніра.* Т. 1: Термомеханіка багатокомпонентних тіл низької електропровідності / Я. Й. Бурак, О. Р. Гачкевич, Р. Ф. Терлецький. – Львів: СПОЛОМ, 2006. – 300 с.
4. *Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я. Й. Бурака, Р. М. Кушніра.* Т. 4: Термомеханіка намагнетичуваних електропровідних термочутливих тіл / О. Р. Гачкевич, Б. Д. Дробенко. – Львів: СПОЛОМ, 2010. – 256 с.
5. *Bay F., Labbe V., Favennec Y., and Chenot J. L.* A numerical model for induction heating processes coupling electromagnetism and thermomechanics // *Int. J. Num. Meth. Eng.* – 2003. – **58**, No. 6. – P. 839–867.
6. *Pantelyat I. G. and Zgraja J.* Inductive heating of large steel disks: coupled electromagnetic, thermal and mechanical simulation // *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.* – 1999. – **10**. – P. 185–192.
7. *Magnabosco I., Ferro P., Tiziani A., and Bonollo F.* Induction heat treatment of a ISO C45 steel bar: Experimental and numerical analysis // *Comput. Mater. Sci.* – 2006. – **35**. – P. 98–106.
8. *Kim D. H., Kim B. M., and Kang C. G.* Die life considering the deviation of the preheating billet temperature in hot forging process // *Finite Elem. Anal. Des.* – 2005. – **41**. – P. 1255–1269.
9. *Drobenko B., Hachkevych J., and Kournyts'kyi T.* A mathematical simulation of high temperature inductive heating of electroconductive solids // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2007. – **50**. – P. 616–624.
10. *Drobenko B., Hachkevych J., and Kournyts'kyi T.* Thermomechanical behaviour of polarizable and magnetizable electroconductive solids subjected to induction heating // *J. Eng. Mathematics.* – 2008. – **61**, No. 2–4. – P. 249 – 269.
11. *Allen D. H. and Heisler W. E.* A theory for analysis of thermoplastic materials // *Comput. Struct.* – 1981. – **13**. – P. 129–135.
12. *Преображенский А. А.* Магнитные материалы и элементы. – М.: Высш. шк., 1976. – 336 с.
13. *Turowski J.* *Elektrodynamika Techniczna.* – Warszawa: WNT, 1993. – 463 s.
14. *Сосуды и трубопроводы высокого давления.* Справочник / Под. ред. Е. Р. Хисматулина. – М.: Машиностроение, 1990. – 334 с.
15. *Таблицы физических величин / Под ред. И. К. Кикоина.* – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
16. *Головин Г. Ф., Замятин М. М.* Высокочастотная термическая обработка. – Л.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
17. *Богородский Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М.* Электротехнические материалы. – Л.: Энергия, 1977. – 352 с.

Поступила 28. 11. 2016