

*Г. О. АНИЩЕНКО, В. І. КОНОХОВ, Д. В. ЛАВІНСЬКИЙ*

## ОСОБЛИВОСТІ ТЕРМОДЕФОРМУВАННЯ СКЛАДЕНИХ ІНДУКТОРІВ ПРИ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНІЙ ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ

Розглянуто проблему врахування впливу нестационарного неоднорідного температурного поля під час аналізу напружено-деформованого стану індукторних систем для магнітно-імпульсної обробки матеріалів. З проведеного аналізу відкритих інформаційних джерел випливає, що проблема аналізу нестационарного температурного поля, що виникає внаслідок наявності неоднорідного електромагнітного поля, та його впливу на деформування достатньо вивчена стосовно питань індукційного нагріву. У той же час і за інших операцій магнітно-імпульсної обробки матеріалів нагрівання обладнання може викликати додаткові деформації значної величини, що, у свою чергу, може призводити до втрати працездатності обладнання внаслідок руйнування або незворотного деформування. Запропоновано загальний підхід до аналізу подібних завдань, що передбачає визначення просторово-часових розподілів кількісних характеристик електромагнітного поля, температурного поля та напружено-деформованого стану. Обґрунтовано необхідність використання чисельних методів для проведення подібного аналізу. Найбільш ефективним чисельним методом є метод скінченних елементів, який дозволяє проводити аналіз нестационарного електромагнітного поля, температурного поля та напружено-деформованого стану в рамках однієї і тієї ж розрахункової схеми. У цьому випадку в рамках методу скінченних елементів можуть бути створені ітераційні схеми, що дозволяють враховувати нелінійні ефекти. Тут нелінійні ефекти можуть бути обумовлені залежністю механічних та електрофізичних властивостей матеріалу від температури, пластичним характером деформування, а також необхідністю обліку контактних явищ. Наведено результати комплексного аналізу для складеного одновиткового індуктора з діелектричним бандажем. Врахування особливостей контактної взаємодії здійснено за допомогою введення шарів контактних скінченних елементів. Оцінено напружено-деформований стан індуктора для двох варіантів використовуваних матеріалів: міді та немагнітної сталі.

**Ключові слова:** нестационарне температурне поле, електромагнітне поле, напружено-деформований стан, магнітно-імпульсна обробка матеріалів, метод скінченних елементів, контактна задача.

The problem of taking into account a non-stationary inhomogeneous temperature field in the analysis of the stress-strain state of inductor systems for magnetic-pulse processing of materials is considered. It follows from the analysis of open information sources that the problem of analyzing a non-stationary temperature field arising from the presence of a non-uniform electromagnetic field and its effect on deformation has been sufficiently studied in relation to induction heating. At the same time, during other operations of magnetic-pulse processing of materials, heating of equipment can cause additional deformations of a significant magnitude, which, in turn, can lead to a loss of equipment performance due to destruction or irreversible deformation. A general approach to the analysis of such problems is proposed, which involves the determination of the spatial-temporal distributions of the quantitative characteristics of the electromagnetic field, temperature field and stress-strain state. The necessity of using numerical methods for carrying out such an analysis has been substantiated. The most effective numerical method is the finite element method, which makes it possible to analyze the unsteady electromagnetic field, temperature field, and stress-strain state within the same calculation scheme. In this case, within the framework of the finite element method, iterative schemes can be created that allow taking into account nonlinear effects. Here, nonlinear effects can be due to the dependence of the mechanical and electro-physical properties of the material on temperature, the plastic nature of deformation, and the need to take into account contact phenomena. The results of complex analysis for a composite single-turn inductor with a dielectric band are presented. The features of contact interaction were taken into account by introducing layers of contact finite elements. The stress-strain state of the inductor is estimated for two variants of the materials used: copper and non-magnetic steel.

**Keywords:** transient temperature field, electromagnetic field, stress-strain state, magnetic-pulse processing of materials, finite element method, contact problem.

**Вступ.** Електромагнітне поле (ЕМП) використовується у багатьох технологічних процесах та є невід'ємним чинником функціонування багатьох технічних об'єктів. Вплив ЕМП залежить від типу матеріалу. У випадку електропровідних матеріалів найбільш яскраві прояви – силовий та температурний (завдяки виникненню розподілених джерел тепловиділення згідно до закону Джоуля-Ленця).

Енергія ЕМП може сягати значних рівнів, за яких деформування елементів технічних та технологічних систем стає небезпечним з точки зору можливого руйнування або незворотної формозміни. При довготривалому впливі нестационарних ЕМП також і температура може досягати значної величини, за якої можуть виникати відчутні температурні деформації або навіть наступати фазові зміни матеріалу.

При розробці елементів нової техніки та технологічних систем важливу роль відіграє проведення адекватного аналізу напружено-деформованого стану (НДС) з метою подальшого оцінювання працездатності обладнання. При врахуванні при цьому термодформацій необхідно попередньо визначати розподіл температурного поля (ТП).

Силовий вплив ЕМП на електропровідні матеріали знайшов ефективне застосування у класі технологічних операцій, відомих під загальною назвою магнітно-імпульсна обробка матеріалів (МІОМ). МІОМ відзначається достатньо високою екологічною чистотою, малою відхідністю та технологічністю. Прилади МІОМ – індуктори відчують силовий вплив разом із заготовками, що деформуються. Розрахунковий аналіз деформування елементів технологічних систем на етапі проектування та доведення дозволяє розробляти працездатні індуктори із високою ефективністю.

Таким чином, створення методів розрахункового аналізу деформування елементів індукторних систем з урахуванням відповідних особливостей є актуальною науково-практичною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основи та підходи використання енергії сильних та надсильних ЕМП викладені у роботах [1-4]. Теоретичні засади використання енергії ЕМП у операціях МІОМ та підходи до створення відповідних технологічних систем викладені у класичній праці [5].

Сучасний стан справ у розробці технологічних систем МІОМ висвітлено у роботах [6-8].

Слід відзначити, що при усьому різноманітті представлених досліджень стосовно деформування заготовок, дослідженню деформування індукторів практично не приділяється уваги. Також недостатньо розроблені питання врахування впливу нестационарних неоднорідних ТП на НДС елементів технологічних систем МІОМ. Винятком є технологічні операції індукційного нагріву, для яких питання визначення нестационарних ТП дослідженні достатньо добре [9].

Водночас зрозуміло, що єдиним правильним підходом до створення методів розрахункового аналізу у даному випадку є використання чисельних методів і для визначення розподілу кількісних характеристик ЕМП, розподілу ТП, а також розподілу компонентів НДС.

Докладне висвітлення можливостей і особливостей застосування чисельних методів для аналізу розповсюдження ЕМП наведено у монографії [10]. Відзначимо, що деякі з наведених чисельних методів, наприклад метод скінчених різниць, можуть ефективно використовуватись і для визначення нестационарних ТП.

Водночас, у випадку необхідності дослідження НДС, на який впливає ТП та ЕМП, найбільш ефективним є використання методу скінчених елементів (МСЕ), оскільки він не накладає практично ніяких обмежень на можливості побудови розрахункових моделей найбільш наближених до реальності. Також відзначимо, що МСЕ дозволяє враховувати різноманітні нелінійні явища (залежність фізико механічних властивостей від температури, великі деформації, непружне деформування, контактні явища) за рахунок побудови відповідних ітераційних процедур. Особливості використання МСЕ для аналізу деформування за умов технологічних операцій МІОМ представлено у роботах [11,12].

**Мета статті.** На сучасному етапі розвитку знаходять застосування технологічні процеси МІОМ, спрямовані на притягнення тонких заготовок з феромагнітних та не феромагнітних матеріалів. Практичне застосування даних технологій пов'язане із проведенням ремонтних робіт корпусних елементів транспортних засобів [13,14]. Важливою науковою задачею є проведення всебічного розрахункового аналізу індукторних систем МІОМ з метою визначення раціональних експлуатаційних та конструкційних параметрів.

**Аналіз результатів.** У роботі [13] запропоновано використання одновиткового індуктора із конічною робочою зоною. Він виконується з немагнітних матеріалів, призначенням його є притягнення плоских феромагнітних заготовок з метою подальшого деформування.

У роботах [15,16] представлено повну математичну постановку задачі аналізу

нестационарного ЕМП, ТП та пружно-пластичного деформування одновиткового індуктора у двох варіантах: без та разом із діелектричним бандажем. Індуктор розглядався виконаним із міді. Встановлено, що індуктор без бандажу не відповідає умовам технологічної операції: за номінальних значень струму у імпульсі пластичне деформування заготовки не відбувається. При збільшенні амплітуди сили струму індуктор починає деформуватись непружно, тобто втрачає працездатність. Використання бандажу із натягом дозволяє покращити працездатність індуктора, проте і у цьому випадку його застосування обмежується показниками міцності міді.

Одним з можливих варіантів розширення експлуатаційних можливостей подібних індукторів є їх виконання з немагнітної сталі (яка має значно вищі показники міцності у порівнянні із міддю). Проте сталь має майже у 50 разів меншу електропровідність, що призводить до її значного нагріву. З'ясування обґрунтованості використання сталі у даному випадку спирається на результати розрахункового аналізу деформування складеного індуктора з урахуванням внеску від термдеформування.

Розв'язання поставленої задачі повинне виконуватись у три етапи: визначення просторово-часових розподілів ЕМП, визначення нестационарного ТП (у припущенні, що температура не впливає на електрофізичні властивості матеріалів матриці та індуктора) та подальший аналіз пружно-пластичного деформування.

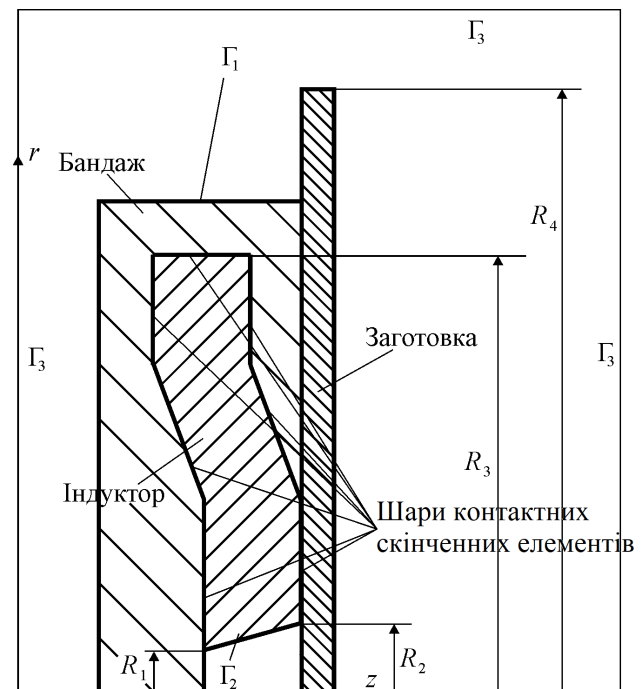


Рис. 1 – Розрахункова схема складеного одновиткового індуктора та плоскої заготовки

При визначенні розподілу ЕМП матриця розглядалась оточеною повітряним середовищем, на границях якого ( $\Gamma_i$ ) задавалась рівність нулю векторного магнітного потенціалу (затухання ЕМП). В

якості джерела поля приймався струм, рівномірно розподілений по поверхні кінцевого отвору індуктора, в часі густина струму приймалася за законом:

$$j(t) = I_m e^{-\delta 2\pi ft} \cdot \sin(2\pi ft),$$

де амплітуда сили струму

$$I_m = 30 \text{ кА},$$

частота

$$f = 2 \text{ кГц},$$

відносний коефіцієнт загасання

$$\delta = 0,3.$$

При визначенні нестационарного ТП повітряне середовище не розглядалась, а на зовнішніх поверхнях індуктора та заготовки задавались умови конвекційного теплообміну із сталим коефіцієнтом.

Поміж частинами індуктора, а також поміж індуктором та заготовкою вводились шари контактних скінченних елементів, властивості яких обирались згідно до рекомендацій роботи [16]

Аналіз одержаних результатів показав, що використання у якості матеріалу індуктора немагнітної сталі дозволяє збільшувати амплітуду сили струму на 17 відсотків, при цьому індуктор продовжує деформуватись пружно, тобто залишається працездатним. Слід відзначити, при цьому що однакові проміжки часу сталевий індуктор нагрівається на 30 відсотків більше у порівнянні із мідним індуктором.

**Висновки.** У роботі розглянуті питання аналізу термодформування складених індукторних систем магнітно-імпульсної обробки матеріалів. Запропанована загальна розрахункова стратегія, яка передбачає використання методу скінченних елементів для розв'язання трьох задач: визначення розподілу електромагнітного поля, нестационарного теплового поля та аналізу пружно-пластичного деформування. Дана стратегія проілюстрована на прикладі аналізу деформування складеного індуктора для притягнення тонких феромагнітних заготовок. Подальший розвиток висвітленої проблеми полягає в уточненому аналізі з урахуванням пружно-пластичного деформування заготовки в умовах нестационарного нагріву.

#### Список літератури

1. Lange K. Handbook of metal forming / K. Lange, K. Pöhlndt // New York et al.: McGraw-hill. – London. – 1985. – Vol. 8. – 900 p.
2. Herlach F. Strong and ultrastrong magnetic fields and their applications / Herlach F. // Berlin. – 1985. – Vol. 57. – 367 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-13504-9>
3. Mamalis A. G. Electromagnetic forming and powder processing: trends and developments / A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, A. G. Kladas, A. K. Koumoutsos // Applied Mechanics Reviews. 2004. Vol. 57, No. 4. P. 299–324. <https://doi.org/10.1115/1.1760766>

4. Rudnev V. Handbook of induction heating / V. Rudnev, D. Loveless, R. L. Cook // New York. – 2017. – 772 p. <https://doi.org/10.1201/9781315117485>
5. Білий І. В. Довідник з магнітно-імпульсної обробки металів / І. В. Білий, С. М. Фертик, Л. Т. Хименко // Харків. – 1977. – 188 с.
6. Pysk V. Electromagnetic forming – a review / V. Pysk, D. Risch, B. L. Kinsey, A. E. Tekkaya, M. Kleiner // Journal of Materials Processing Technology. – 2011. – vol. 211. – no. 5. – P. 787–829. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012>
7. Thomas J. D. On electromagnetic forming processes in finitely strained solids: Theory and examples / J. D. Thomas, N. Triantafyllidis // Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2009. No. 57(8). P. 139–1416. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2009.04.004>
8. Mamalis A. G. Electromagnetic forming tools and processing conditions: numerical simulation / A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, A. G. Kladas, A. K. Koumoutsos // Materials and Manufacturing Processes. 2006. No. 21(4). P. 411–423. <https://doi.org/10.1080/10426910500411785>
9. Pantelyat M. G. Magneto-thermo-elastic-plastic simulation of inductive heating of metals / M. G. Pantelyat, M. Féliachi // The European Physical Journal Applied Physics. – 2002. – no. 1 (17). – P. 29–33. <https://doi.org/10.1051/epiap:2001001>
10. Подільців А. Д. Елементи теорії та чисельного розрахунку електромагнітних процесів у провідних середовищах / А. Д. Подільців, І. Н. Кучерява // Київ. – 1999. – 362 с.
11. Stiemer M. Algorithmic formulation and numerical implementation of coupled electromagnetic-inelastic continuum models for electromagnetic metal forming / M. Stiemer, J. Unger, B. Svendsen, H. Blum // International journal for numerical methods in engineering. – 2006. – no. 68 (13). – P. 1301–1328. <https://doi.org/10.1002/nme.1738>
12. Stiemer M. An arbitrary Lagrangian Eulerian approach to the three-dimensional simulation of electromagnetic forming / M. Stiemer, J. Unger, B. Svendsen, H. Blum // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2009. No. 198 (17–20). P. 1535–1547. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2009.01.014>
13. Batygin Y. V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals – fundamentals and perspective applications / Y. V. Batygin, S. F. Golovashchenko, A. V. Gnatov // Journal of Materials Processing Technology. – 2013. – vol. 213. – no. 3. – P. 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003>
14. Batygin Y. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals / Y. V. Batygin, S. F. Golovashchenko, A. V. Gnatov // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – vol. 214. – no. 2. – P. 390–401. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.018>
15. Altenbach H. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields / H. Altenbach, O. Morachkovsky, K. Naumenko, D. Lavinsky // Continuum Mechanics and Thermodynamic. – 2016. – vol. 28. – no. 5. – P. 1421–1433. <https://doi.org/10.1007/s00161-015-0484-8>
16. Lavinskii D. V. Elastoplastic Deformation of Bodies Interacting Through Contact Under the Action of Pulsed Electromagnetic Field / D. V. Lavinskii, O. K. Morachkovskii // Strength of Materials. – 2016. – vol. 48. – No. 6. – P. 760–767. <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9822-3>

#### References (transliterated)

1. Lange K., Pöhlndt K. (Eds.). Handbook of metal forming. New York et al.: McGraw-hill. London, 1985. Vol. 8. 900 p.
2. Herlach F. Strong and ultrastrong magnetic fields and their applications. Berlin, 1985. Vol. 57. 367 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-13504-9>
3. Mamalis A. G., Manolakos D. E., Kladas A. G., Koumoutsos A. K. Electromagnetic forming and powder processing: trends and developments. Applied Mechanics Reviews. 2004, vol. 57, no. 4, pp. 299–324. <https://doi.org/10.1115/1.1760766>
4. Rudnev V., Loveless D., Cook R. L. Handbook of induction heating. New York, 2017. 772 p. <https://doi.org/10.1201/9781315117485>

5. Belyi I. V., Fertik S. M., Khimenko L. T. *Spravochnik po magnitno-impul'snoy obrabotke metallov*. [Handbook on magnetic-pulse processing of metals.] Kharkov, 1977. 188 p.
6. Psyk V., Risch D., Kinsey B. L., Tekkaya A. E., Kleiner M. Electromagnetic forming – a review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, vol. 211, no. 5, pp. 787–829. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.012>
7. Thomas J. D., Triantafyllidis N. On electromagnetic forming processes in finitely strained solids: Theory and examples. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2009, no. 57(8), pp. 139–1416. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2009.04.004>
8. Mamalis A. G., Manolakos D. E., Kladas A. G., Koumoutsos A. K. Electromagnetic forming tools and processing conditions: numerical simulation. *Materials and Manufacturing Processes*. – 2006. – no. 21(4). – pp. 411–423. <https://doi.org/10.1080/10426910500411785>
9. Pantelyat M. G., Féliachi M. Magneto-thermo-elastic-plastic simulation of inductive heating of metals. *The European Physical Journal Applied Physics*. 2002, – no. 1 (17), pp. 29–33. <https://doi.org/10.1051/epjap:2001001>
10. Podol'cev A. D., Kucheryavaya I. N. Elementy teorii i chislennogo analiza elektromagnitnykh processov v provodyaschikh sredakh [Elements of the theory and numerical calculation of electromagnetic processes in conducting media]. Kiev, 1999. 362 p.
11. Stieme M., Unger J., Svendsen B., Blum H. Algorithmic formulation and numerical implementation of coupled electromagnetic-inelastic continuum models for electromagnetic metal forming. *International journal for numerical methods in engineering*. 2006, no. 68 (13), pp. 1301–1328. <https://doi.org/10.1002/nme.1738>
12. Stieme M., Unger J., Svendsen B., Blum H. An arbitrary Lagrangian Eulerian approach to the three-dimensional simulation of electromagnetic forming. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2009. – no. 198 (17–20). – pp. 1535–1547. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2009.01.014>
13. Batygin Y. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V. Pulsed electromagnetic attraction of sheet metals–fundamentals and perspective applications. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013, vol. 213, no. 3, pp. 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.10.003>
14. Batygin Y. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014, vol. 214, no. 2, pp. 390–401. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.018>
15. Altenbach H., Morachkovskiy O., Naumenko K., Lavinsky D. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. *Continuum Mechanics and Thermodynamic*. 2016, vol. 28, no. 5. pp. 1421–1433. <https://doi.org/10.1007/s00161-015-0484-8>
16. Lavinskii D. V., Morachkovskii O. K. Elastoplastic Deformation of Bodies Interacting Through Contact Under the Action of Pulsed Electromagnetic Field. *Strength of Materials*. 2016, vol. 48, no. 6. pp. 760–767. <https://doi.org/10.1007/s11223-017-9822-3>

Надійшла (received) 05.12.2021

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Аніщенко Галина Оттівна (Anischenko Galyna Ottivna)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри теоретичної механіки; e-mail: halyna.anishchenko@khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-4980>

**Конохов Володимир Іванович (Konokhov Volodymyr Ivanovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри механіки суцільного середовища та опору матеріалів; e-mail: volodymyr.konokhov@khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9938-204X>

**Лавінський Денис Володимирович (Lavinskyi Denys Volodymyrovych)** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри теоретичної механіки; тел.: (050) 566-42-92; e-mail: Denys.Lavinskyi@khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1380-3131>