



Морачковский О. К.
д.т.н., професор

Лавінський Д. В.
к.т.н., доцент

*Національний технічний
університет
„Харківський
політехнічний
інститут”*

УДК 539.3

ДЕФОРМУВАННЯ СКЛАДЕНИХ ІНДУКТОРІВ ІЗ ДОПОМІЖНИМ ЕКРАНОМ ПРИ МАГНІТНО- ІМПУЛЬСНІЙ ОБРОБЦІ

У статті розглядається пружно-пластичне деформування складеного індуктора із допоміжним екраном та заготовки при магнітно-імпульсній обробці. Наведені умови контактної взаємодії. В якості чисельного методу розв'язання використовується метод скінчених елементів. Контактна взаємодія моделюється шляхом введення спеціальних шарів контактних елементів. Одержані просторово-часові розподіли характеристик електромагнітного поля та процесу деформування. Представлені деякі результати, які дозволяють робити певні рекомендації щодо проектування та застосування технологічних операцій подібного класу.

Ключові слова: пружно-пластичне деформування, електромагнітне поле, метод скінчених елементів, контактна взаємодія, магнітно-імпульсна обробка.

Вступ. Велика кількість технологічних операцій використовує енергію електромагнітного поля (ЕМП). Силовий вплив використовується у класі технологічних операцій, які одержали назву магнітно-імпульсна обробка матеріалів (МІОМ). Інструменти МІОМ деформуються разом із заготовками під дією ЕМП. Це призводить до виникнення високо інтенсивних полів напружень та деформацій, що викликає зменшення довговічності інструмента. Викладені факти свідчать про необхідність застосування розрахункових методів аналізу ЕМП та НДС елементів обладнання технологічних пристроїв МІОМ на етапі проектування та доведення.

Постановка завдання. Окремий клас технологічних операцій МІОМ спрямовано на створення умов для незворотного деформування тонких листових заготовок з метою виправлення можливих дефектів. Для обробки заготовок із неферромагнітних матеріалів запропоновано використовувати складені індуктори із допоміжним екраном [1,2]. У роботі [3] розглядаються питання визначення характеристик ЕМП та процесу деформування для одновиткового індуктора із допоміжним екраном, який можна вважати модельним зразком. Проте, зусилля, які діють на заготовку

у випадку одновиткового індуктора, є недостатніми для здійснення незворотного деформування заготовки. Збільшити величину електромагнітної сили можливо шляхом збільшення кількості витків стурмопроводу.

На рис.1 наведено розрахункову схему багатовиткового індуктора із допоміжним екраном. Заготовка розглядається на певній відстані від індуктора, що необхідно для моделювання можливих вм'ятин. Розв'язання повинно відбуватись у два етапи: на першому визначається просторово-часовий розподіл характеристик ЕМП та на цій основі просторово-часовий розподіл електромагнітних сил, на другому відбувається аналіз НДС індуктора і заготовки для максимальних значень діючих електромагнітних сил. Аналіз НДС надає можливість зробити висновок про ефективність технологічної операції та про працездатність інструмента – індуктора. Будемо вважати технологічну операцію ефективною, якщо у матеріалі заготовки виникнуть зони пластичних деформацій. Індуктор будемо вважати працездатним, якщо напруження у матеріалі струмопроводу та допоміжного екрану не перевищуватимуть межу текучості, у матеріалі ізоляції – межу міцності на розтяг, також необхідно перевірити чи не відбудеться відрив екрану ізоляції.

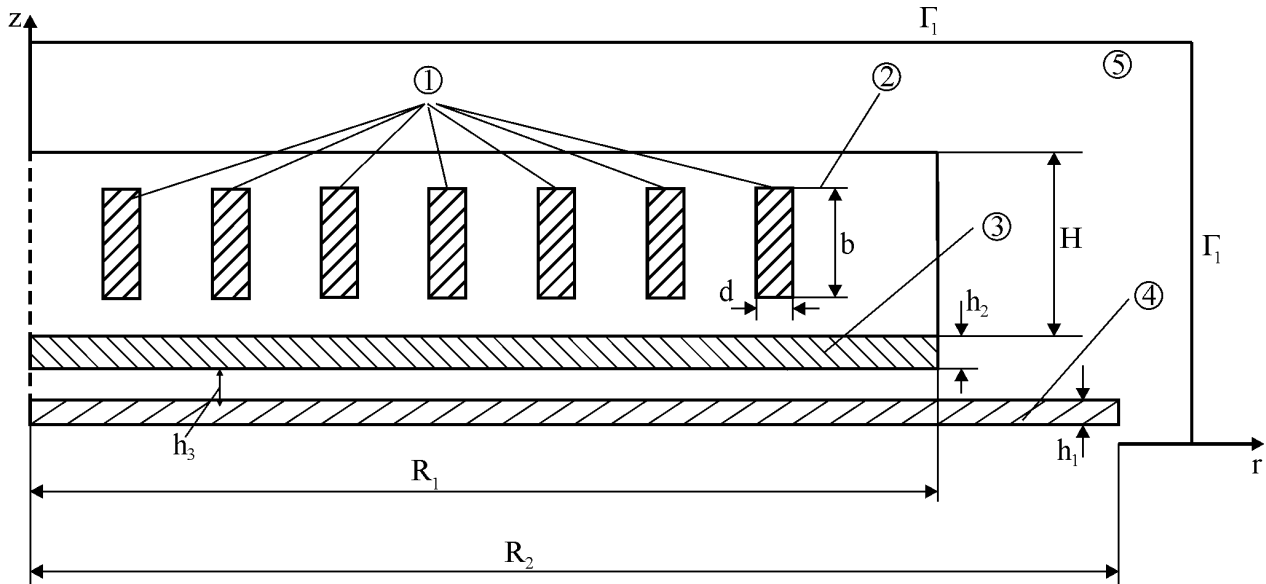
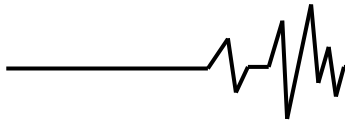


Рис. 1. Розрахункова схема індуктора разом із заготовкою. 1 – струмопровід індуктора, 2 – ізоляція струмопроводу, 3 – допоміжний екран, 4 – заготовка, 5 – оточуюче середовище (повітря)

Повну систему рівнянь, що описує розповсюдження векторних компонент ЕМП та тензорних компонент НДС при пружно-пластичному деформуванні наведено у роботі [4]. Оскільки у нашому випадку індуктор є складеним, то при розв'язанні необхідно враховувати умови контактної взаємодії його елементів. Стосовно розповсюдження ЕМП на границі розділу двох тіл повинні виконуватись наступні умови:

$$\begin{aligned} (\vec{E}_m - \vec{E}_{m+1}) \times \vec{n} = 0, \quad (\vec{D}_m - \vec{D}_{m+1}) \cdot \vec{n} = 0; \\ (\vec{H}_m - \vec{H}_{m+1}) \times \vec{n} = 0, \quad (\vec{B}_m - \vec{B}_{m+1}) \cdot \vec{n} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

тут \vec{H}, \vec{E} – вектори напруженості магнітного та електричного полів; \vec{D}, \vec{B} – вектори електричної та магнітної індукції у об'ємі тіла та на границі (Γ) тіла; \vec{n} – нормаль до контактної границі. У даній моделі ми нехтуємо можливим поверхневим електричним опором, наявністю поверхневих зарядів та струмів.

Умови механічної контактної взаємодії приймемо у вигляді:

$$\vec{n} \cdot \vec{\sigma}^m \cdot \vec{n} = \vec{n} \cdot \vec{\sigma}^{m+1} \cdot \vec{n} \leq 0; \quad (2)$$

$$\vec{u}^m \cdot \vec{n} + \vec{u}^{m+1} \cdot \vec{n} - \delta \leq 0.$$

При цьому дотичні напруження зв'язані із нормальними у рамках закону Кулона:

$$|\vec{n} \cdot \vec{\sigma}^m \cdot \vec{\tau}| = f \vec{n} \cdot \vec{\sigma}^m \cdot \vec{n}, \quad (3)$$

тут $\vec{n}, \vec{\tau}$ – одиничні вектори спільної нормалі та спільної дотичної відповідно.

При знаходженні просторово-часових розподілів основних векторних компонентів ЕМП користуємось способом введення скалярного та векторного потенціалів і тоді при нехтуванні рухом електропровідного тіла, а також змінності його електрофізичних характеристик система визначальних рівнянь зводиться до вигляду:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \frac{1}{\mu_c \gamma} \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) + \vec{\nabla} \phi = \vec{J}; \\ \Delta \phi = \rho_e. \end{cases} \quad (4)$$

тут \vec{A} – векторний магнітний потенціал, ϕ – скалярний електричний потенціал, μ_c, γ – магнітна проникність та електропровідність матеріалу, ρ_e – густина розподілених електричних зарядів, \vec{J} – вектор густини струму. Питання визначальних рівнянь для аналізу НДС за умов пружно-пластичного деформування докладно розглянуті у роботах [3,4].

Аналіз результатів. Геометричні параметри елементів розрахункової схеми (рис.1) є наступними: кількість витків – 23, $R_1 = 70 \text{ mm}$, $R_2 = 100 \text{ mm}$, $H = 22 \text{ mm}$, $h_1 = 1 \text{ mm}$, $h_2 = 2 \text{ mm}$, $h_3 = 1 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$, товщина ізоляції струмопроводу – 1 mm. У таблиці 1 наведені



фізико-механічні параметри елементів системи. Розміри оточуючого середовища, а також граничні умови обирались відповідно до рекомендацій роботи [5,6]. Джерелом ЕМП обирався струм, що був рівномірно розподіленим по перерізу витків струмопроводу, у часі густина струму змінювалась за законом:

$$j(t) = I_m e^{-\delta 2\pi f t} \cdot \sin(2\pi f t)$$
, де амплітуда сили струму $I_m = 40$ кА, частота $f = 2$ кГц, відносний коефіцієнт затухання $\delta = 0.3$.

Розв'язання проводилось із застосуванням методу скінчених елементів (МСЕ). Скінчено-елементна модель була створена із застосуванням чотирьох-вузлового скінченого елемента із білінійною апроксимацією переміщень та окружної компоненти векторного магнітного потенціалу [5,6]. Умови контактної ізоляцією, між струмопроводом та ізоляцією вводились шари контактних скінчених елементів, які моделювали відповідні умови взаємодії, так між екраном та ізоляцією враховувався натяг (0.02 мм)

Таблиця 1

Фізико-механічні параметри елементів системи

	струмопровід, мідь	допоміжний екран, сталь	заготовка, сталь	ізоляція, капролон	повітря
μ_r	1	1	1	1	1
$\gamma, (\Omega m)^{-1}$	7×10^7	0.2×10^7	0.2×10^7	0	0
E , ГПа	180	215	200	2.5	–
ν	0.33	0.27	0.29	0.3	–
σ_T , МПа	200	270	220	–	–
σ_B^+ , МПа	–	–	–	70	–
σ_B^- , МПа	–	–	–	90	–

Одержані просторово-часові розподіли векторних компонент ЕМП та компонент електромагнітної сили уздовж поверхні заготовки дозволили зробити висновки про можливі місця максимального силового впливу

на заготовку. Максимальні значення електромагнітної сили спостерігаються у околі центральних витків індуктора на початку імпульсу.

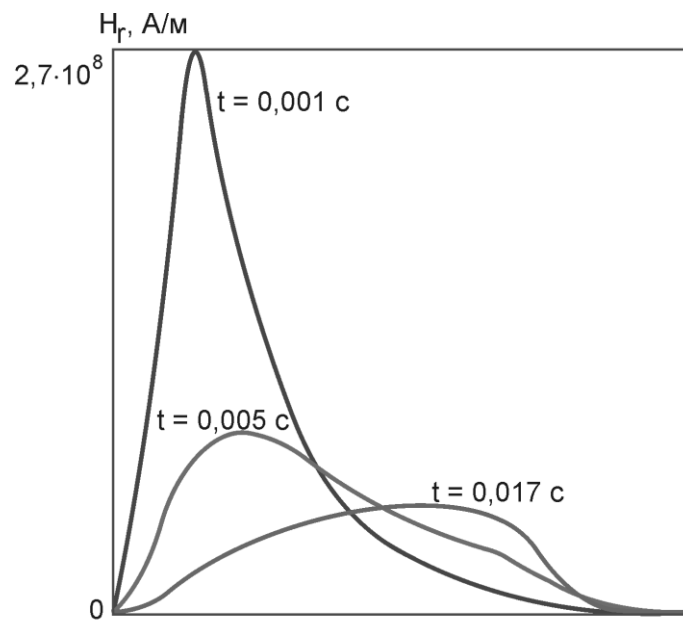


Рис. 2. Розподіл дотичної компоненти напруженості магнітного поля по поверхні заготовки у різні моменту часу



Сумісне деформування індуктора та заготовки розглядалось у момент часу, що відповідає максимальним значенням електромагнітної сили, результати надані для часового максимуму. З рис. 3 видно, що

переміщення заготовки значно перевищують переміщення індуктора. Максимальні значення переміщень заготовки спостерігаються в околі її центру.

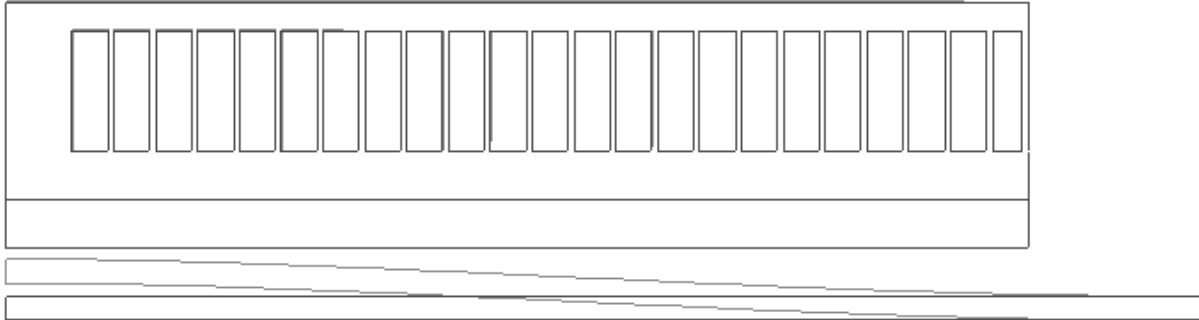


Рис. 3. Деформований стан індуктора і заготовки за максимальних значень електромагнітної сили

Відзначимо, що інтенсивність напружень у заготовці перевищує межу текучості її матеріалу, величини інтенсивності напружень у матеріалі струмопроводу, екрану та ізоляції не перевищують критичних значень. Також аналіз контактної взаємодії екрану та ізоляції індуктору показав, що екран не відходить від ізоляції.

Таким чином, за обраних геометричних параметрів та умов зовнішнього впливу технологічна операція МІОМ, яка спрямована на притягнення заготовок із метою виправлення дефектів є ефективною, при цьому індуктор є

Висновки: у статті розглянуто актуальну науково-практичну проблему аналізу пружно-пластичного деформування складених індукторів для магнітно-імпульсної обробки матеріалів.

Список використаних джерел

1. Batygin Y. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*. 214 (2), 390-401 (2014).
2. Yuri V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov, Evgeniy A. Chaplygin Pulsed Electromagnetic Attraction Processes for Sheet Metal Components. *High speed forming 2014, proceedings of the 6th International conference*, May 26–29, 2014 Daejeon, Korea, 253-260.
3. Лавінський Д. В. Пружно-пластичне деформування складених конструкцій при дії електромагнітного поля / Д. В. Лавінський, О. К. Морачковський // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2016. – № 3 (83). – С. 103-108.

4. Altenbach H., Morachkovsky O., Naumenko K., Lavinsky D. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. *Continuum Mechanics and*.

5. Cazzani, A., Atluri, S.N.: Four-noded mixed finite elements, using unsymmetric stresses, for linear analysis of membranes. *Comput. Mech.* 11 (4), 229–251 (1993).

6. Cazzani, A., Garusi, E., Tralli, A., Atluri, S.N.: A four-node hybrid assumed-strain finite element for laminated composite plates. *CMC Comput. Mater. Contin.* 2 (1), 23–38 (2005).

Список джерел в транслітерації

1. Batygin Y. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*. 214 (2), 390-401 (2014).
2. Yuri V. Batygin, Sergey F. Golovashchenko, Andrey V. Gnatov, Evgeniy A. Chaplygin Pulsed Electromagnetic Attraction Processes for Sheet Metal Components. *High speed forming 2014, proceedings of the 6th International conference*, May 26–29, 2014 Daejeon, Korea, 253-260.
3. Lavinskiy D. V. pruzhn'oyu-plastychne deformuvannya Skladennya konstruktsiy pry Dii elektromahnitnoho polya / D. V. Lavins'kiy, O. K. Morachkovs'kiy // *Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh*. - 2016. - № 3 (83). - S. 103-108.
4. Altenbach H., Morachkovsky O., Naumenko K., Lavinsky D. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. *Continuum Mechanics and*.
5. Cazzani, A., Atluri, S.N.: Four-noded mixed finite elements, using unsymmetric



stresses, for linear analysis of membranes. *Comput. Mech.* 11 (4), 229–251 (1993).

6. Cazzani, A., Garusi, E., Tralli, A., Atluri, S.N.: A four-node hybrid as-sumed-strain finite element for laminated composite plates. *CMC Comput. Mater. Contin.* 2 (1), 23–38 (2005).

ДЕФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВНЫХ ИНДУКТОРОВ СО ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМ ЭКРАНОМ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ

Аннотация. В статье рассматривается упруго-пластическое деформирование составного индуктора со вспомогательным экраном и заготовки при магнитно-импульсной обработке. Приведены условия контактного взаимодействия. В качестве численного метода решения используется метод конечных элементов. Контактное взаимодействие моделируется путем введения специальных слоев контактных элементов. Получены пространственно-временные распределения характеристик электромагнитного поля и процесса деформирования. Представлены некоторые результаты, позволяющие давать определенные рекомендации для разработки и использования технологических операций подобного класса.

Ключевые слова: упруго-пластическое деформирование, электромагнитное поле, метод конечных элементов, контактное взаимодействие магнитно-импульсная обработка.

DEFORMATION OF COMPOSED COILS WITH ASSISTANT SCREEN UNDER THE ELECTROMAGNETIC FORMING

Annotation. A large number of technical and technological facilities work under the action of electromagnetic fields. In electroconductive bodies have significant largest electromagnetic forces that can cause movement or deformation of structural elements. The creation of effective methods of analysis of the distribution of the electromagnetic field and coupled inelastic deformation of structural elements is topical at present time. The article contains a mathematical formulation of the contact problem of inelastic deformation of structural elements under the action of electromagnetic fields. Coupling of electromagnetic field and mechanical field is carried out with the help of local electromagnetic forces. Further made the transition to a variational formulation on the basis of the task of finding the minimum of the total energy of the system, which includes the energy of the electromagnetic field. For the numerical solution the finite element method is used. Nodal unknowns in this case are the magnetic vector potential and displacements. The proposed method is applied to non-stationary deformation of the "inductor-billet" technological operation of magnetic-pulse processing of metals. Some results of the deformation are presented.

Key words: inelastic deformation, electromagnetic field, the finite element method, contact interaction, magnetic-pulse processing.

Відомості про авторів

Морачковський Олег Костянтинович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної механіки Національного технічного університету „ХПІ” (вул. Кирпичьова, 2, м. Харків, Україна, 61002, e-mail: morachko@ukr.net).

Лавінський Денис Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної механіки Національного технічного університету „ХПІ” (вул. Кирпичьова, 2, м. Харків, Україна, 61002, e-mail: denis.lavinsky@ukr.net).

Морачковский Олег Константинович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики Национального технического университета „ХПИ” (ул. Кирпичова, 2, г. Харьков, Украина, 61002, e-mail: morachko@ukr.net).

Лавинский Денис Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики Национального технического университета „ХПИ” (ул. Кирпичова, 2, г. Харьков, Украина, 61002, e-mail: denis.lavinsky@ukr.net).

Morachkovskii Oleg – Doctor of Technical Sciences, Professor, head of Department of theoretical mechanics National technical university “KhPI” (St. Kyrpychova, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, e-mail: morachko@ukr.net).

Lavinskii Denis – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor the Department of theoretical mechanics National technical university “KhPI” (St. Kyrpychova, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, e-mail: denis.lavinsky@ukr.net).