

Лавінський Д.В., Морачковський О.К.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

АНАЛІЗ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ СКЛАДЕНОГО ІНДУКТОРА ПРИ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНІЙ ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ

Електромагнітне поле (ЕМП) є умовою функціонування багатьох технічних і технологічних систем. Взаємодія ЕМП з електропровідними тілами приводить до їх руху або деформації. При цьому рівні енергії ЕМП можуть бути настільки значними, що призведуть до незворотної деформації або руйнування конструктивних елементів. Широкий клас технологічних процесів обробки матеріалів тиском використовує енергію імпульсних магнітних полів. При цьому силовому впливу піддається як заготовка так і джерело ЕМП – індуктор. Ефективність технологічних систем магнітно-імпульсної обробки матеріалів (МІ-ОМ) визначається працездатністю індуктора, оцінювання якої є можливим лише на основі аналізу розподілу векторних характеристик ЕМП та тензорних характеристик напружено-деформованого стану (НДС). У роботі [1] запропоновано ефективний комплексний підхід до подібного аналізу. Один із класів тех-

нологічних операцій МІОМ передбачає притягнення металевих заготовок. Для притягнення електропровідних заготовок із не феромагнітних матеріалів (із відносною магнітною проникністю менше одиниці) у роботі [2] показано, що можна використовувати індуктор із допоміжним екраном. На рис. 1 наведено модельний варіант одновиткового індуктора із допоміжним екраном.

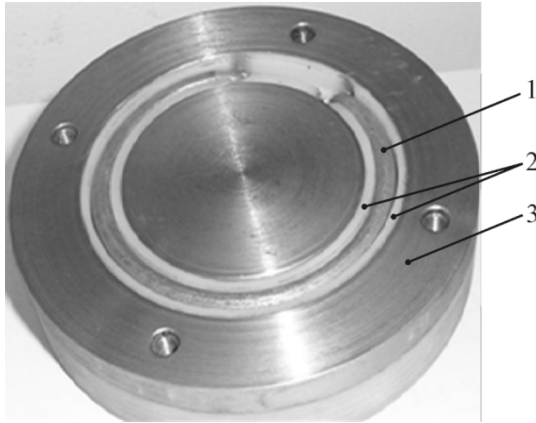


Рисунок 1. – Одновитковий індуктор із допоміжним екраном.
1 – струмопровід індуктора,
2 – ізоляція струмопровіда,
3 – допоміжний екран

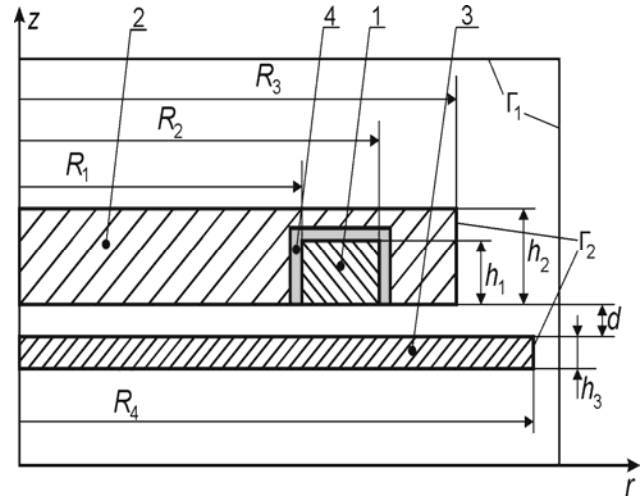


Рисунок 2. – Розрахункова схема індуктора разом із заготовкою.
1 – струмопровід індуктора, 2 – допоміжний екран, 3 – заготовка,
4 – ізоляція струмопроводу

Проаналізуємо пружно-пластичне деформування індуктора із заготовкою в рамках вісесиметричної розрахункової схеми, наведеної на рис.2. Розрахункова схема містить окрім елементів технологічної системи та заготовки також оточуюче середовище (повітря). Зазор, що розглядається поміж індуктором та заготовкою, повинен імітувати наявність вм'ятини (дефекту) на заготовці. Геометричні параметри системи є наступними: $R_1 = 150 \text{ mm}$, $R_2 = 167 \text{ mm}$, $R_3 = 175 \text{ mm}$, $R_4 = 200 \text{ mm}$, $h_1 = 10 \text{ mm}$, $h_2 = 15 \text{ mm}$, $h_3 = 1 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$, товщина ізоляції струмопроводу – 1 mm . Розміри оточуючого середовища варіювались із метою досягнення умов затухання компонентів ЕМП на віддалені від джерела поля. У даному випадку виявилось, що для зменшення компонентів ЕМП у 5 разів, достатньо обирати розміри оточуючого середовища рівними подвійній товщині індуктора h_2 . Джерелом ЕМП обирався струм, що був рівномірно розподілений по перерізу 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 $I_m = 40 \text{ kA}$, частота $f = 2 \text{ kHz}$, відносний коефіцієнт затухання $\delta = 0,3$.

Скінчено-елементна модель була створена із застосуванням чотирьох-вузлового скінченого елемента із білінійною апроксимацією переміщень та окружної компоненти векторного магнітного потенціалу. Використання скінченого елемента даного типу дозволяє автоматично задовольняти умовам на границях розділу середовищ із різними електрофізичними властивостями.

Таблиця 1. – Фізико-механічні параметри елементів системи

	Струмopрoвід, мідь	Дoпoмiжний eкpан, cтaль	Зaгoтoвкa, cтaль	Ізoляцiя, кaпpoлoн	Пoвiтpя
μ_r	1	1	1	1	1
$\gamma, (\Omega\text{m})^{-1}$	7×10^7	$0,2 \times 10^7$	$0,2 \times 10^7$	0	0
$E, \text{ГПа}$	180	215	200	2,5	–
ν	0,33	0,27	0,29	0,3	–
$\sigma_T, \text{МПа}$	200	270	220	–	–
$\sigma_B^+, \text{МПа}$	–	–	–	70	–
$\sigma_B^-, \text{МПа}$	–	–	–	90	–

Розв'язання було проведене для нульових початкових умов, граничні умови відображали затухання ЕМП на віддаленні від джерела, а також закріплення торців індуктора та заготовки:

$$A|_{\Gamma_1} = 0; \quad u_r|_{\Gamma_2} = 0; \quad u_z|_{\Gamma_2} = 0. \quad (1)$$

На першому етапі розв'язання були одержані просторово-часові розподіли векторних компонент ЕМП та компонент електромагнітної сили уздовж поверхні заготовки. Максимальні значення нормальної компоненти електромагнітної сили спостерігаються у околі витка індуктора.

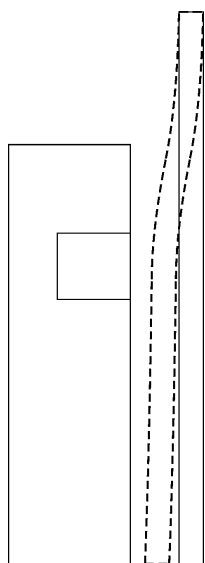


Рисунок 3. – Деформований стан індуктора та заготовки. Суцільна лінія – початковий стан, штрихова лінія – деформований стан

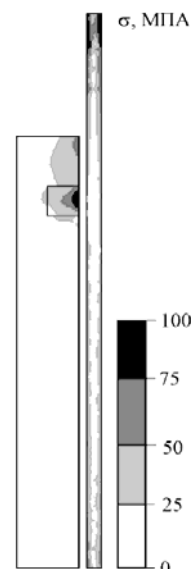


Рисунок 4. – Інтенсивність напружень у індукторі та заготовці

Далі розглянемо сумісне деформування індуктора та заготовки, результати надані для часового максимуму. На рис. 3 наведений деформований стан системи, видно, що переміщення заготовки значно перевищують переміщення індуктора. Максимальні значення переміщень заготовки спостерігаються в околі її центру. На рис. 4 наведено розподіл інтенсивності напружень у індукторі та заготівці. Максимальні значення інтенсивності напружень у заготівці спостерігаються в околі

торцевої зони, що обумовлюється заданими там умовами закріплення. «Другий» максимум спостерігається у центрі, що обумовлене максимальними переміщеннями у цій зоні. Відзначимо, що максимальні значення інтенсивності напружень у заготівці не досягають межі текучості, тобто незворотна формозміна за даних умов не досягається. У індукторі максимальна інтенсивність спостерігається в околі витка, причому її значення майже досягають межі текучості міді та межі міцності на розтяг для капролона. Таким чином, за розглянутих умов ціль технологічної операції не досягається. При збільшенні величини сили струму будуть збільшуватись і величин напружень, при цьому інтенсивність напружень досягне опарних значень спершу у індукторі. Для досягнення цілій технологічної операції можна використовувати багатовитковий варіант індуктора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Altenbach H., Morachkovsky O., Naumenko K., Lavinsky D. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 27 (12), 1-13 (2015).
2. 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).