

УДК 539.3

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У МЕТАЛІЗОВАНІЙ ФЕРИТОВІЙ ПЛАСТИНІ, ЗУМОВЛЕНИХ ОБ'ЄМНИМИ МАГНІТОСТАТИЧНИМИ ХВИЛЯМИ**

Роман Івасько<sup>1</sup>, Карен Казарян<sup>2</sup>, Аніда Станік-Беслер<sup>3</sup>, Дмитро Тарлаковський<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, м. Львів;

<sup>2</sup>Інститут механіки НАН Вірменії, м. Єреван;

<sup>3</sup>Політехніка Опольська, м. Ополье;

<sup>4</sup>Інститут механіки МДУ, м. Москва

Мініатюризація пристроїв надвисокочастотної (НВЧ) техніки є неможливою без використання довгохвильових когерентних (з постійною різницею фаз) дипольних спінових хвиль (магнітостатичних хвиль – МСХ) у феритових плівках. За континуального підходу їх подають у вигляді хвиль прецесії вектора спонтанної намагніченості. Ці хвилі збуджуються і приймаються за допомогою вузьких металевих провідників (антен), розташованих на поверхні плівки. Тип збудженої хвилі визначається напрямом постійного магнітного поля. МСХ суттєво відрізняються від звичайних НВЧ електромагнітних хвиль широким діапазоном частот (1 – 110 ГГц), можливістю електричної перебудови частоти (змінюючи зовнішнього сталого магнітного поля), відносно низькою груповою швидкістю, можливістю керування дисперсією (змінюючи геометричні розміри хвилеводу чи резонатора), невеликими втратами, простотою способів збудження та ресстрації [1].

У літературі ґрунтовно проаналізовано умови збудження та поширення МСХ у феритових елементах електротехнічних пристроїв, але практично не розглядаються теплові та механічні процеси, що їх супроводжують. У більшості цих праць не досліджено умови часткового поглинання матеріалом енергії МСХ, наслідком якого є його нагрівання, а також виникнення механічних напружень, спричинених нагрівом чи силовими чинниками дії поля.

У роботі визначено та досліджено параметри фізико-механічних процесів у металізованій намагніченій феритовій пластині за дії нормального постійного і дотичного гармонічного магнітних полів. Електромагнітне поле вважаємо зовнішньою дією, яка проявляється в середовищі через енергетичні (притік енергії або тепловиділення) та силові чинники (пондеромоторні сили та моменти сил). У такому наближенні визначення температурних полів і напружень у тілі зведено до послідовного розв'язування відповідної задачі електродинаміки (перший етап) та задачі термопружності (другий етап) за заданих початкових і крайових умов.

Використовуючи при розв'язанні нелінійних рівнянь електродинаміки метод малого параметра [2] (за обмеження двома членами розкладу) отримано вирази для напруженості, намагніченості та індукції магнітного поля. Визначено інтервал частот, за яких у пластині виникають і поширюються об'ємні МСХ. У межах смуги пропускання проаналізовано частотні залежності хвильових чисел, амплітуд гармонік намагніченості та індукції магнітного поля, температури, нормальних та дотичних напружень, а також розподіли температури та напружень за товщинною координатою.

Виявлено, що амплітуди намагніченості та індукції магнітного поля практично збігаються (тобто порівняно з ними амплітуда напруженості магнітного поля є нехтовно малою). Показано, що нормальні напруження  $\sigma_{zz}$  є нехтовно малими, порівняно з напруженнями  $\sigma_{xx}$ . Зазначено, що об'ємні МСХ приводять до появи компоненти  $\pi_{xy}$  антисиметричного тензора натягів Максвелла (нехтовно малої, порівняно з напруженнями  $\sigma_{zz}$ ).

Отримано, що амплітуди намагніченості та індукції магнітного поля, а також температура та механічні напруження досягають максимальних значень на першій граничній частоті. Визначено критичне значення напруженості гармонічного магнітного поля, за якого температура досягає точки Кюрі (матеріал втрачає феромагнітні властивості), наслідком чого стає неможливість поширення об'ємних МСХ.

1. *Hachkevych O.R., Solodyak M.T., Terlets'kyi R.F., Ivas'ko R.O.* Three-dimensional magnetostatic waves caused by electromagnetic fields in metallized ferrite plates // J. Mat. Sci. – 2019. – **55**, No. 3. – P. 327–336.
2. *Hachkevych O.R., Solodyak M.T., Terlets'kyi R.F., Tarlakovskii D.V.* Electrodynamic relations, energy and force factors of the actions of electromagnetic fields for magnetic media // J. Mat. Sci. – 2015. – **50**, No. 4. – P. 545–554.

#### **MATHEMATICAL MODELING OF PHYSICO-MECHANICAL PROCESSES IN METALLIZED FERRITE PLATE CAUSED BY THREE-DIMENSIONAL MAGNETOSTATIC WAVES**

*By using a well-known technique for finding the characteristics of magnetic field based on the method of decomposition of unknown quantities in the series by a small parameter (chosen as the ratio of amplitude of the tangential harmonic field to the amplitude of normal constant field) and restricting ourselves to the first two terms of decomposition, were determined and investigated the conditions of excitation and the regularities of propagation of three-dimensional magnetostatic waves (3DMSW) in metallized normally magnetized ferrite plate, depending on the character of the external electromagnetic field and electrophysical characteristics of the material.*