

УДК 539.3

## МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ДВОШАРОВИХ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ ТІЛ ЗА ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ДІЙ

Роман Івасько<sup>1</sup>, Наталія Мельник<sup>2</sup>, Роман Мусій<sup>2</sup>, Стефан Моринь<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів;

<sup>3</sup>Політехніка Опольська, м. Опольце

Двошарові електропровідні тіла (ДЕТ) різної геометричної конфігурації часто використовують як елементи конструкцій багатьох приладів і пристроїв. У процесі їх функціонування та експлуатації такі елементи зазнають впливу різних фізичних дій, зокрема, електромагнітних імпульсного характеру. Внаслідок цього в ДЕТ виникають джерела тепла Джоуля  $Q$  і пондеромоторні сили  $\vec{F}$ . Ці два фізичні фактори впливу імпульсного електромагнітного поля (ЕМП) на ДЕТ створюють в кожному  $n$ -му ( $n=1,2$ ) складовому шарі поля температури  $T^{(n)}$  і напружень  $\hat{\sigma}^{(n)}$  та відповідні їм інтенсивності напружень  $\sigma_i^{(n)}$ . За певних параметрів імпульсного ЕМП величина інтенсивності напружень  $\sigma_i^{(n)}$  в кожному  $n$ -му складовому шарі може досягнути межі пружної деформації  $\sigma_d^{(n)}$  матеріалу  $n$ -го шару. Тоді  $n$ -й шар втрачає несучу здатність, а, отже, ДЕТ в цілому втрачає роботоздатність як елемент конструкції.

Для прогнозування надійності роботоздатності пристрою, який містить конструктивний елемент у вигляді ДЕТ, за дії зовнішніх імпульсних ЕМП необхідно побудувати математичну модель термомеханічної поведінки ДЕТ за таких дій.

У літературі [1] викладено математичну модель термомеханічної поведінки однорідних електропровідних тіл за дії імпульсних ЕМП. Ця модель враховує (на основі відомих експериментальних досліджень [2]) адиабатичність процесів нагріву і деформування електропровідного тіла за таких ЕМП. На основі цієї моделі отримані загальні розв'язки початково-крайових задач термомеханіки однорідних електропровідних тіл канонічної форми (шару, порожнистих і суцільних циліндра та кулі) за однорідної нестационарної електромагнітної дії. Записано розв'язки даних задач для розглядуваних однорідних електропровідних тіл канонічної форми за дії імпульсних ЕМП з модуляцією амплітуди, що мають характер режимів з імпульсним модульним сигналом (РІМС) та згасної синусоїди (РЗС). Чисельно проаналізовано температурні поля і напруження, а також несучу здатність розглядуваних однорідних електропровідних тіл канонічної форми

<http://iapmm.lviv.ua/cpt2021/materials/C01.20.pdf>

за дії імпульсних ЕМП в РІМС та РЗС. Встановлено закономірності термомеханічної поведінки однорідних електропровідних тіл канонічної форми за вказаних імпульсних електромагнітних дій.

У випадку ДЕТ наявність з'єднання складових шарів, матеріали яких однорідні, ізотропні та неферомагнітні, вимагає виконання умов ідеальних електромагнітного, теплового та механічного контактів. При цьому процеси нагріву і деформування за дії імпульсних ЕМП можуть бути неадіабатичними в рамках цілого ДЕТ.

Запропоновано математичну модель визначення термонапруженого стану і несучої здатності, а також збереження властивостей контактного з'єднання ДЕТ за дії імпульсних ЕМП. Сформульовано початково-крайові задачі термомеханіки для ДЕТ канонічної форми за дії однорідного нестационарного ЕМП. Використано квадратичну апроксимацію всіх визначальних функцій (відповідної дотичної до поверхні тіла компоненти вектора напруженості магнітного поля, температури та відповідної компоненти тензора динамічних напружень) за відповідною координатою по товщині кожного складового шару розглядуваного ДЕТ.

Це дало змогу точно врахувати всі задані крайові умови як на зовнішніх поверхнях ДЕТ, так і на поверхнях з'єднання їх складових шарів. У результаті вихідні початково-крайові задачі на визначальні функції зведено до відповідних задач Коші на інтегральні характеристики цих функцій. Отримано загальні розв'язки задач Коші у вигляді згорток функцій, що містять однорідні розв'язки цих задач та задані крайові умови за однорідної нестационарної електромагнітної дії.

Знайдено розв'язки сформульованих початково-крайових задач за дії імпульсних ЕМП, що мають характер РІМС. На їх основі чисельно досліджено закономірності термомеханічної поведінки розглядуваних ДЕТ канонічної форми, виготовлених з неферомагнітних матеріалів (нержавна сталь, мідь, алюміній), за електромагнітної дії в РІМС залежно від її амплітудно-частотних характеристик та часу тривалості.

1. *Гачкевич О.Р., Мусій П.С., Тарлаковський Д.В.* Термомеханіка неферомагнітних електропровідних тіл за дії імпульсних електромагнітних полів з модуляцією амплітуди. – Львів: «СПОЛОМ», 2011. – 216 с.
2. *Herlach F.* Pulsed magnets // Rep. Prog. Phys. – 1989. – 62, No. 6. – P. 859–920.

#### **SIMULATION OF THERMOMECHANICAL BEHAVIOR OF TWO-LAYER ELECTROCONDUCTIVE BODIES UNDER PULSE ELECTROMAGNETIC ACTIONS**

*A mathematical model for determining the thermal stress state and bearing capacity, as well as the properties preservation of the two-layer electroconductive bodies contact connection under the pulsed electromagnetic field action has been proposed.*