

УДК 539.3

## ТЕРМОНАПРУЖЕНИЙ СТАН БІМЕТАЛЕВИХ ПЛАСТИН ЗА ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ НЕУСТАЛЕНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ

**Карен Казарян, Роман Мусій, Наталія Мельник**

*Інститут механіки АН Вірменії,  
Національний університет «Львівська політехніка»*

ghkarren@gmail.com, roman.s.musii@lpnu.ua, nataliia.b.melnyk@lpnu.ua

Біметалеві пластини (БП) часто використовують як функціональні елементи конструкцій багатьох пристроїв. У процесі роботи цих пристроїв чи технологічної обробки БП, крім силових і теплових фізичних дій, вони зазнають також впливу зовнішніх електромагнітних полів (ЕМП).

Відомі окремі роботи про термообробку БП з допомогою індукційного нагріву усталеним ЕМП. Проте у сучасних технологічних процесах обробки БП, як елементів відповідних пристроїв, все частіше використовують індукційний нагрів неусталеним ЕМП (НЕМП). Дія НЕМП зумовлює виникнення у БП полів температури та напружень. За певних величин і градієнтів цих полів у БП виникають інтенсивності напружень, значення яких можуть досягати межі пружної деформації матеріалів складових шарів БП і, навіть, перевищувати її. Також значення інтенсивності напружень у складових шарах БП у площині їх контакту можуть перевищувати межу міцності з'єднання цих шарів. За таких умов БП втрачають працездатність як конструктивні елементи. Тому дослідження працездатності БП при індукційному нагріві НЕМП, зокрема, імпульсного характеру, є актуальною як науковою, так і інженерно-технічною, проблемою.

Розглядається БП, віднесена до декартової системи координат  $OXYZ$ . Координатна площина  $XOY$  збігається з площиною  $z=0$  з'єднання складових шарів БП, яка обмежена основами  $z=-h_1$  і  $z=h_2$ . Тут  $h_1$ ,  $h_2$  – товщини складових шарів БП, а їх матеріали однорідні, ізотропні і неферромагнітні. Фізико-механічні характеристики цих матеріалів вважаємо сталими і рівними їх середнім значенням в розглядуваному діапазоні зміни температури. На площині  $z=0$  з'єднання складових шарів БП виконуються умови ідеального електромагнітного, теплового і механічного контактів. Основи  $z=-h_1$  і  $z=h_2$  перебувають за умов конвективного теплообміну з довкіллям та вільні від поверхневого силового навантаження. За вказаних умов БП зазнає індукційного нагріву НЕМП, зокрема, з модуляцією амплітуди, яке визначається

значеннями дотичної до основ БП компоненти  $H_y^{(n)}(z, t)$  вектора напруженості магнітного поля, що практично математично описується виразом у вигляді [1]:

$$H_y^{(1)}(-h_1, t) = H_y^{(2)}(h_2, t) = kH_0 \left( e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t} \right) \cos \omega. \quad (1)$$

Тут  $H_0$  – амплітуда синусоїдальних несучих електромагнітних коливань частоти  $\omega$ ;  $k$  – нормувальний множник;  $\beta_1$  і  $\beta_2$  – параметри, що відповідають часам фронтів наростання і спадання НЕМП тривалості  $t_i$ .

Вираз НЕМП, окреслений формулою (1), дає змогу врахувати моменти включення і виключення НЕМП при індукційному нагріві. При моделюванні термонапруженого стану БП за дії НЕМП за частот  $\omega$  з поза околу резонансних для таких полів [1, 2] термонапружений стан БП в основному визначається теплом Джоуля  $Q^{(n)}$ , яке зумовлює температурне поле  $T^{(n)}$  і компоненти  $\sigma_{jj}^{(n)}$  ( $j = x, y, z$ ) тензора напружень та відповідні їм інтенсивності напружень  $\sigma_i^{(n)}$  в  $n$ -му ( $n = 1, 2$ ) складовому шарі БП [2, 3].

Знайдено вирази  $T^{(n)}$ ,  $\sigma_{jj}^{(n)}$  та  $\sigma_i^{(n)}$  за індукційного нагріву БП НЕМП, окресленого виразом (1). Чисельно проаналізовано ці величини залежно від амплітудно-частотних параметрів НЕМП і часу  $t_i$  тривалості індукційного нагріву БП. Встановлено граничні значення цих параметрів, за яких при розглядуваному індукційному нагріві за відомих значень допустимих напружень в шарах БП і такого значення для контактного з'єднання БП в цілому, як конструктивний елемент, втрачає працездатність.

1. Гачкевич О.Р., Мусій Р.С., Тарлаковський Д.В. Термомеханіка неферомагнітних електропровідних тіл за дії імпульсних електромагнітних полів з модуляцією амплітуди. – Львів, СПОЛОМ, 2011. – 216 с.
2. Подстригач Я.С., Бурак Я.И., Гачкевич А.Р., Чернявская Л.В. Термоупругость электропроводных тел. – К.: Наук. думка, 1977. – 248 с.
3. Подстригач Я.С., Коляно Ю.М. Неустановившиеся температурные поля и напряжения в тонких пластинках. – Киев: Наук. думка, 1972. – 308 с.

#### **THERMAL STRESS STATE OF BIMETALLIC PLATES UNDER INDUCTION HEATING BY AN UNSTEADY ELECTROMAGNETIC FIELD**

*A mathematical model for determining the thermal-stress state of a bimetallic plate during its induction heating by an unsteady electromagnetic field is proposed. A methodology for assessing the performance of such a plate depending on the amplitude-frequency parameters of the unsteady electromagnetic field and the time of induction heating of the bimetallic plate is proposed. The limit values of these parameters, at which the bimetallic plate loses its operability as a structural element, have been established.*