

Вплив резонансних частот на термонапружений стані несучу здатність біметалевого циліндра за електромагнітної дії в режимі з імпульсним модульованим сигналом

Роман Мусій¹, Наталія Мельник²

¹ д. ф.-м. н., професор, Національний університет „Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, e-mail: musij@polynet.ua

² к. ф.-м. н., Національний університет „Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, e-mail: melnyk.n.pz@gmail.com

Чисельно проаналізовано термонапружений стан, несучу здатність і властивості контактного з'єднання порожнистого біметалевого циліндра за електромагнітної дії в режимі з імпульсним модульованим сигналом залежно від амплітудно-частотних характеристик такої дії за резонансних частот електромагнітного поля.

Ключові слова: термонапружений стан, біметалевий циліндр, імпульсна електромагнітна дія, режим з імпульсним модульованим сигналом, резонансні частоти, несуча здатність, властивості контактного з'єднання.

Вступ. У статті [1] було подано формулювання задачі термомеханіки для біметалевого порожнистого циліндра, складові шари якого неферромагнітні, однорідні та ізотропні, а фізико-механічні характеристики матеріалів складових шарів постійні. Запропоновано методику її розв'язування та записано загальні розв'язки за електромагнітної дії в режимі з імпульсним модульованим сигналом (РІМС). Проведено чисельний аналіз термонапруженого стану і несучої здатності за несучої частоти поза околom резонансних частот. Однак в процесі експлуатації біметалевих циліндрів у якості електромагнітних перехідників та в процесі зняття небажаних чужорідних електропровідних нашарувань при роботі електролізерів циліндричної форми [2] є важливим дослідження термонапруженого стану, несучої здатності і властивостей контактного з'єднання біметалевого циліндра за резонансних частот електромагнітної дії в РІМС. Тому дана робота є продовженням викладеного в [1] матеріалу за використання частот несучих електромагнітних коливань дії в РІМС, рівним резонансним частотам електромагнітного поля (ЕМП) [3,4] для розглядуваного біметалевого циліндра. Вона присвячена дослідженню впливу резонансних частот електромагнітної дії в РІМС на термопружну поведінку, несучу здатність і властивості контактного з'єднання розглядуваного циліндра.

1. Формулювання задачі

Розглядається довгий порожнистий біметалевий циліндр, віднесений до циліндричної системи координат (r, φ, z) , вісь Oz якої співпадає з віссю циліндра [1,5]. Матеріали складових шарів циліндра однорідні, ізотропні, неферомагнітні, а їх фізико-механічні характеристики постійні. На циліндр діє нестационарне ЕМП, задане значеннями $H_z^\pm(t)$ осьової компоненти $H_z^{(n)}(r, t)$ вектора напруженості магнітного поля $\vec{H}^{(n)}$ на внутрішній $r=r_0$ і зовнішній $r=r_2$ поверхнях циліндра.

Зовнішні поверхні циліндра теплоізовані від довкілля і вільні від силового навантаження. На поверхні $r=r_1$ з'єднання складових шарів мають місце умови ідеального електромагнітного, теплового і механічного контактів [3,6]. За таких умов дія нестационарного ЕМП проявляється двома фізичними чинниками [7] — джоулевым теплом $Q^{(n)} = (\text{rot } \vec{H}^{(n)})^2 / \sigma_n$ та пондеромоторними силами $\vec{F}^{(n)} = \mu_n \text{rot } \vec{H}^{(n)} \times \vec{H}^{(n)}$, де σ_n, μ_n - коефіцієнт електропровідності і магнітна проникність матеріалу n -го складового шару. Ці два фізичні чинники зумовлюють нестационарні температуру $T^{(n)}$ і тензор напружень $\hat{\sigma}^{(n)}$, які визначають термонапружений стан біметалевого циліндра.

Циліндр знаходиться в умовах плоскої деформації, за якої відмінними від нуля є компоненти $\sigma_{ij}^{(n)}$ ($j = r, \varphi, z$) тензора динамічних напружень, що зумовлюють інтенсивності напружень [8,9] $\sigma_i^{(n)} = \sqrt{(3I_2(\hat{\sigma}^{(n)}) - I_1^2(\hat{\sigma}^{(n)}))} / 2$ в n -му складовому шарі. Тут $I_j(\hat{\sigma}^{(n)})$ ($j = 1, 2$) — j -й інваріант тензора $\hat{\sigma}^{(n)}$ сумарних напружень $\hat{\sigma}^{(n)} = \hat{\sigma}^{(n)Q} + \hat{\sigma}^{(n)F}$, де $\hat{\sigma}^{(n)Q}$ і $\hat{\sigma}^{(n)F}$ — напруження, зумовлені джоулевым теплом $Q^{(n)}$ і пондеромоторними силами $\vec{F}^{(n)}$ в n -му шарі. За виконання умов $\max \sigma_i^{(n)} \geq \sigma_d^{(n)}$ та $\max \sigma_i^{(n)*} \geq \sigma_M$ біметалевий циліндр втрачає несучу здатність і властивості контактного з'єднання. Тут $\sigma_d^{(n)}$ - межа пружної деформації матеріалу n -го шару, $\sigma_i^{(n)*}$ — інтенсивність напружень в складових шарх на поверхні їх з'єднання, σ_M - межа міцності контактного з'єднання [10,11].

Відповідно до цього всі визначальні функції задачі, якими є осьова компонента $H_z^{(n)}(r, t)$ вектора напруженості магнітного поля, температура $T^{(n)}(r, t)$ та відмінна від нуля радіальна компонента $u_r^{(n)}(r, t)$ вектора переміщень $\vec{u}^{(n)}(r, t) = \{u_r^{(n)}(r, t); 0; 0\}$ є функціями радіальної координати r та часу t . Стосовно цих функцій сформульовано початково-крайові задачі, розв'язки яких за однорідної нестационарної електромагнітної дії приведені в [1]. На основі цих загальних розв'язків знайдено розв'язок задачі термомеханіки для даного

циліндра за електромагнітної дії в режимі з імпульсним модульним сигналом (РІМС). Нижче приведено результати числового аналізу термонапруженого стану розглядуваного біметалевого циліндра за дії в РІМС за використання частот ЕМП рівних резонансним ω_{rs} ($s=1,2$ — порядок резонансної частоти).

2. Чисельний аналіз задачі за електромагнітної дії в РІМС

Електромагнітна дія в РІМС математично описується значенням функції $H_z^\pm(t)$ у вигляді $H_z^\pm(t) = kH_0(e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t})\cos \omega t$ [4,12]. Тут k — нормувальний множник, β_1 і β_2 — параметри, що характеризують відповідно часи фронтів наростання t_{iner} і спадання t_{dekr} модульного імпульсу тривалості t_i , H_0 — амплітуда синусоїдальних несучих електромагнітних коливань частоти ω .

Чисельний аналіз проведено для біметалевого циліндра з радіусами поверхонь $r_0 = 8$ мм, $r_1 = 9$ мм, $r_2 = 10$ мм, виготовленого з неферромагнітних матеріалів — нержавної сталі Х18Н9Т та міді. Тривалість модульного імпульсу приймалась рівною $t_i = 10^{-4} c$, $10^{-3} c$, $10^{-2} c$. Параметри β_1 і β_2 вибирались таким чином, щоб співвідношення між часом t_{iner} і часом t_{dekr} імпульсу становило $t_{iner}/t_{dekr} \approx 0.1$. У такому випадку $\beta_1 = -\ln \varepsilon/t_i$, $\beta_2 = 2\beta_1$, $\varepsilon = 10^{-3}$, $k = 4$ [4,5].

Дослідження термомеханічної поведінки, несучої здатності та властивостей контактної з'єднання даного біметалевого циліндра за дії в РІМС виконано за першої резонансної частоти ЕМП [3,4] ω_{r1} , що дорівнює $\omega_{r1} = 2.32 \cdot 10^5 1/c$.

Зміну в часі складників $\sigma_{rr}^{(n)F}$, $\sigma_{rr}^{(n)Q}$, $\sigma_{\varphi\varphi}^{(n)F}$ подано на рис. 1 (а,б,в,г), а складників $\sigma_{\varphi\varphi}^{(n)Q}$, $\sigma_{zz}^{(n)F}$ - на рис. 2 (а,б,в,г).

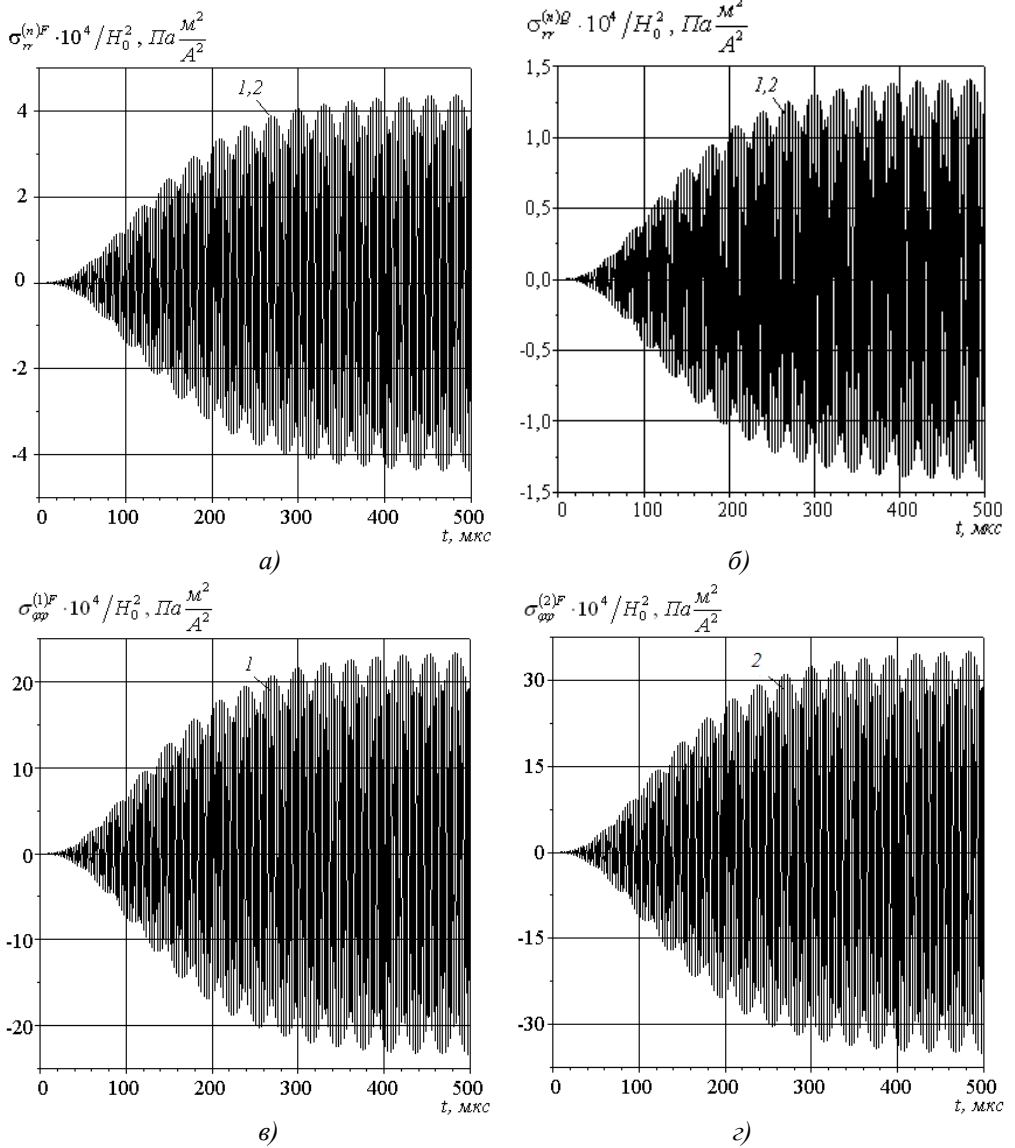


Рис.1. Зміна в часі складників $\sigma_{rr}^{(n)F}$, $\sigma_{rr}^{(n)Q}$ радіальних $\sigma_{rr}^{(n)}$ і складника $\sigma_{\varphi\varphi}^{(n)F}$ колових напружень $\sigma_{\varphi\varphi}^{(n)}$ на поверхні з'єднання складових шарів

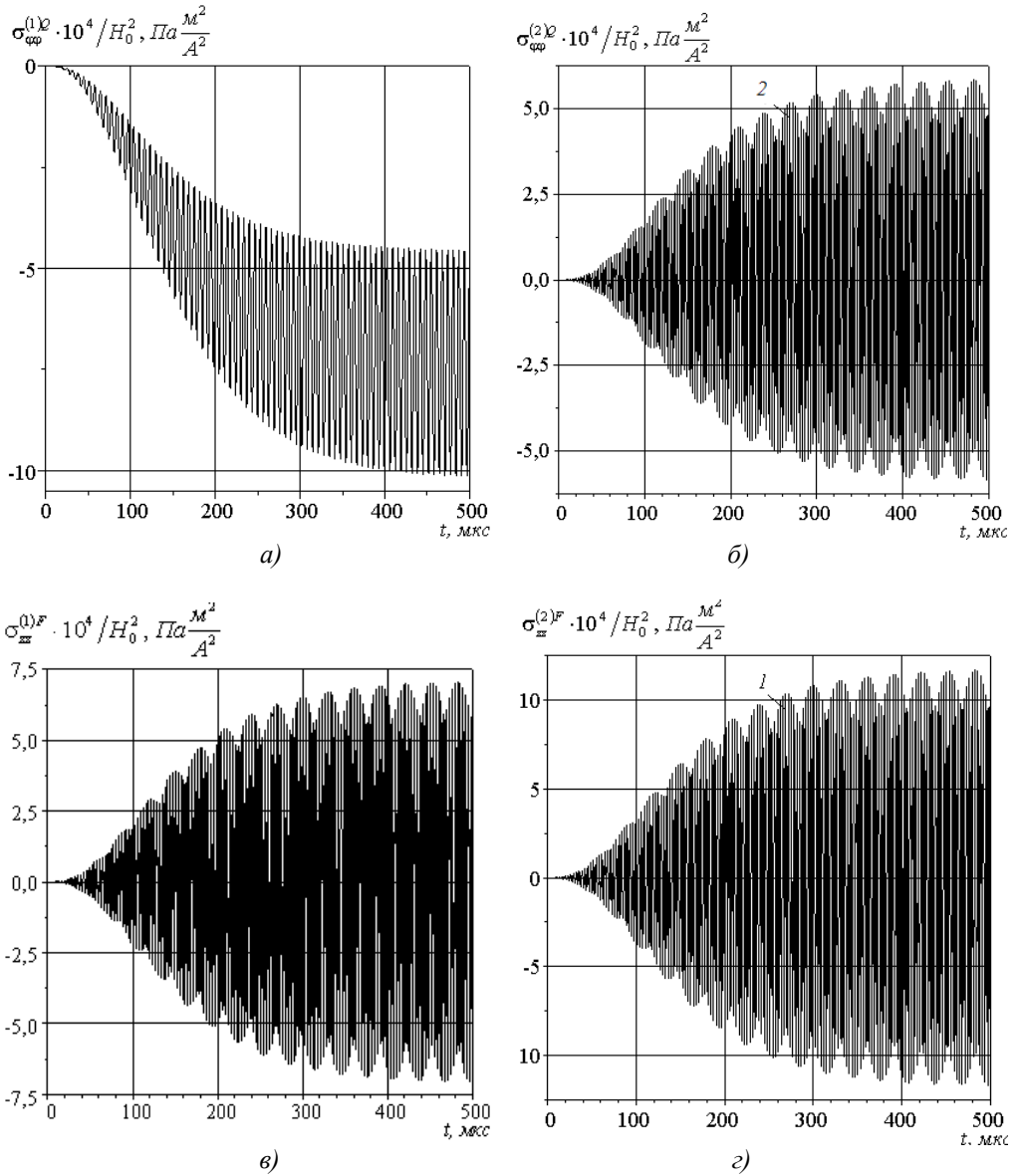


Рис.2. Зміна в часі складника $\sigma_{\varphi\varphi}^{(n)Q}$ колових напружень $\sigma_{\varphi\varphi}^{(n)}$ і складника $\sigma_{zz}^{(n)F}$ осьових напружень $\sigma_{zz}^{(n)}$ на поверхні з'єднання складових шарів

На рис. 3 (а,б,в,г) зображено зміну в часі складників $\sigma_{zz}^{(n)Q}$ та інтенсивності напружень $\sigma_i^{(n)}$ на поверхні з'єднання складових шарів.

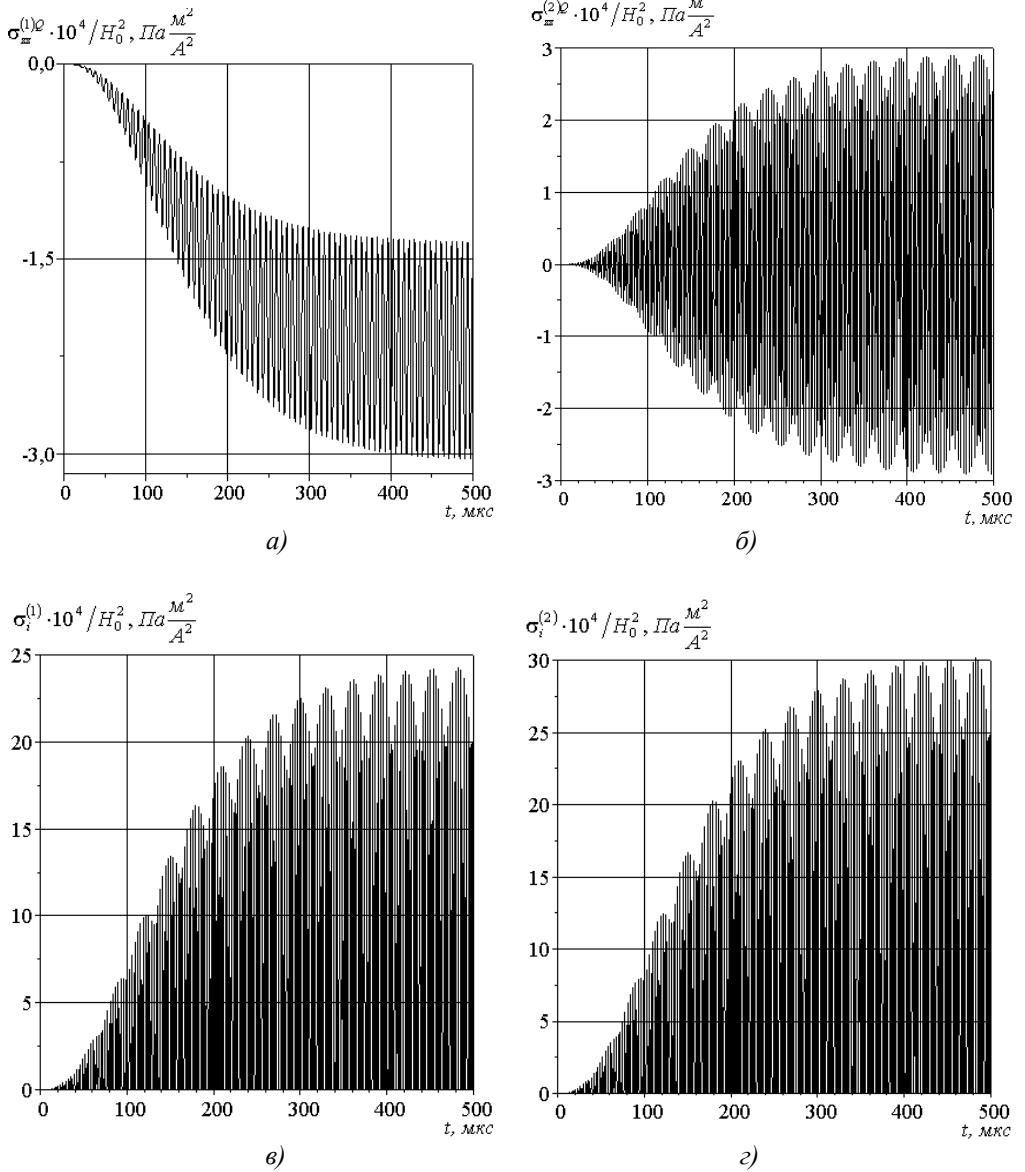


Рис.3. Зміна в часі складника $\sigma_{zz}^{(n)Q}$ осьових напружень та інтенсивності напружень $\sigma_i^{(n)}$ на поверхні з'єднання складових шарів

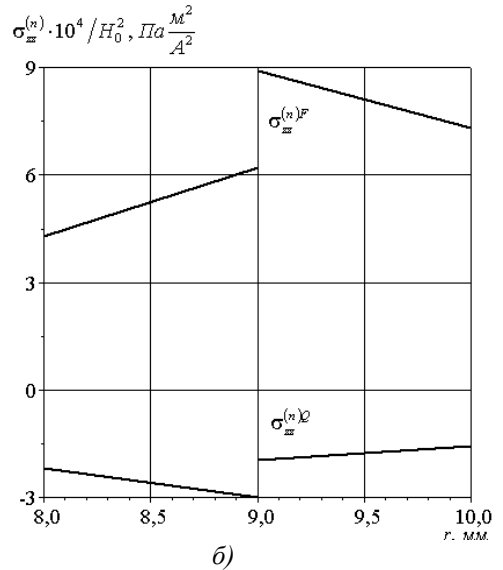
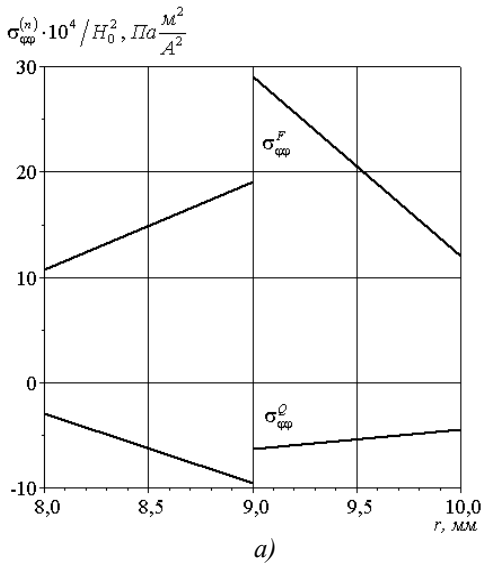
Отримано, що всі складники радіальних, колових і осьових напружень, а також інтенсивності напружень у складових шарах на поверхні їх з'єднання за першої резонансної частоти набувають максимальних значень в момент часу $t \approx 0,5 t_i$. Складники $\sigma_{rr}^{(n)F}$ радіальних напружень у декілька разів більші за

складники $\sigma_{rr}^{(n)Q}$. Колові напруження $\sigma_{\varphi\varphi}^{(n)F}$ у декілька разів перевищують радіальні $\sigma_{rr}^{(n)F}$ та осьові $\sigma_{zz}^{(n)F}$ напруження. Отримано, що складники напружень, зумовлені пондеромоторною силою, вносять визначальний внесок у термонапружений стан розглядуваного циліндра за першої резонансної частоти.

Розподіл по товщині складових шарів циліндра складників $\sigma_{\varphi\varphi}^{(n)F}$, $\sigma_{\varphi\varphi}^{(n)Q}$ колових напружень $\sigma_{\varphi\varphi}^{(n)}$ і складників $\sigma_{zz}^{(n)F}$, $\sigma_{zz}^{(n)Q}$ осьових напружень $\sigma_{zz}^{(n)}$ та інтенсивностей напружень $\sigma_i^{(n)}$ в момент часу $t = 0.5 t_i$ (коли ці величини набувають максимальних значень) зображено на рис. 4 (а,б,в).

Отримано, що максимальні значення вказані величини досягають у складових шарах циліндра на поверхні їх з'єднання.

На рис.4,з подано залежність максимальних значень інтенсивностей напружень $\sigma_{i \max}^{(n)}$ від величини H_0 ($H_{0 \max} = 10^5 A/м$) за частоти $\omega = \omega_{r1}$ дії в РІМС у складових шарах циліндра на поверхні їх з'єднання за тривалостей $t_i = 10^{-3} c, 10^{-2} c$. Лінії 1,2 відповідають сталевому і мідному шарам.



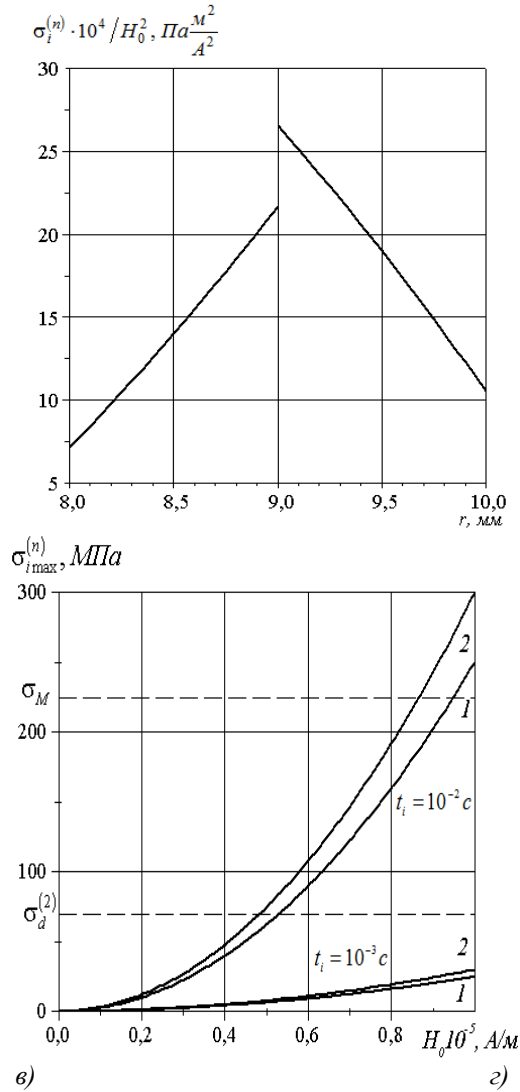


Рис. 4. Розподіл по товщині складових шарів колових $\sigma_{\varphi\varphi}^{(n)}$ (а), осьових $\sigma_{zz}^{(n)}$ (б) напружень, інтенсивностей $\sigma_i^{(n)}$ напружень (в) в момент часу $t = 0.5 t_i$ та залежність $\sigma_{i \max}^{(n)}$ від величини H_0 на поверхні з'єднання шарів (г)

Перетин горизонтальних прямих, що відповідають значенням $\sigma_d^{(2)}$ і σ_M , з побудованими кривими залежностей на рис.4,г дає змогу встановити критичні параметри електромагнітної дії в РІМС, за яких розглядуваний циліндр втрачає несучу здатність і властивості контактного з'єднання. Знайдено, що несуча

здатність і властивості контактного з'єднання циліндра за тривалості $t_i = 10^{-3} c$ зберігаються, а за тривалості $t_i = 10^{-2} c$ — втрачаються. Зауважимо, що за тривалості $t_i = 10^{-2} c$ несуча здатність мідного шару втрачається за величини H_0 , приблизно вдвічі меншій, ніж величина H_0 , за якої втрачаються властивості контактного з'єднання.

Висновки. Виявлено нові закономірності термомеханічної поведінки біметалевого циліндра за електромагнітної дії в РІМС за використання резонансних частот ЕМП. Отримано, що величини напружень та інтенсивностей напружень у складових шарах за першої резонансної частоти ЕМП ω_{r1} приблизно у два рази більша, ніж за другої резонансної частоти ω_{r2} . За дії в РІМС за першої резонансної частоти ЕМП ω_{r1} встановлено критичні значення її параметрів, за яких розглядуваний біметалевий циліндр втрачає несучу здатність і властивості контактного з'єднання.

Література

- [1] Мусій Р.С., Мельник Н.Б. Термонапружений стан довгого порожнистого біметалевого циліндра за електромагнітної дії в режимі з імпульсним модульним сигналом // Вестник Херсонського національного технічного університету. — № 2(45). — Херсон, 2012. — С. 250-254.
- [2] Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хищенко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий — Харьков: МОСТ — Торнадо, 2003. — 288 с.
- [3] Термоупругость электропроводных тел / Я.С. Подстригач, Я.И. Бурак, А.Р. Гачкевич, Л.В. Чернявская. — К.: Наук. думка, 1977. — 248 с.
- [4] Гачкевич О.Р., Мусій Р.С., Тарлаковський Д.В. Термомеханіка неферромагнетних електропровідних тіл за дії імпульсних електромагнетних полів з модуляцією амплітуди. — Львів: СПОЛОМ, 2011. — 216 с.
- [5] Мусій Р. С. Динамічні задачі термомеханіки електропровідних тіл канонічної форми. — Львів: Вид-во «Растр-7», 2010. — 216 с.
- [6] Мусій Р., Мельник Н., Вестяк В., Шимчак Й Несуча здатність біметалевих пластин і циліндрів за імпульсних електромагнітних дій // VII International Conference “POROUS MATERIALS Theory and Experiment (INTERPOR’12) & Symposium “Mathematical Modeling and Optimization in Mechanics” (devoted to the memory of prof. Y.Y.Burak) — Lviv-Briukhovychi, September 18-21, 2012. — С. 79-80.
- [7] Тамм И.Е. Основы теории электричества. — М.: Наука, 1976. — 616 с.
- [8] Ионов В.Н., Огибалов П.М. Напряжения в телах при импульсивном нагружении. — М.: Высш. школа, 1975. — 463 с.
- [9] Лурье А.И. Теория упругости. — М.: Наука, 1970. — 940с.
- [10] Баженов В.Г., Петров М.В. О применении магнитоимпульсного способа деформирования для исследования вязкопластических характеристик материалов. // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения задач упругости и пластичности. Всесоюз. межвуз. сб. Горьк. ун-та, — 1980. — С. 18-25.
- [11] Мэттьюз Ф. Композитные материалы. Механика и технология / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс — М.: Техносфера, 2004. — 408 с.
- [12] Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применение / Под ред. Херлаха Ф. — М.: Мир, 1988. — 456 с.

Effect of resonant frequencies thermostressed condition and bearing capacity of bimetallic cylinder by electromagnetic action mode with pulse modulating signal

Roman Musij, Nataliya Melnyk

Numerical analysis of thermostressed state, load-carrying ability and properties of contact joint of hollow bimetallic cylinder with plane-parallel boundaries under electromagnetic action in the mode with pulse modulated signal depending on the amplitude and frequency characteristics of such action by the conditions of resonant frequencies of the electromagnetic field.

Влияние резонансных частот на термонапряженного состояние и несущую способность биметаллического цилиндра при электромагнитном воздействии в режиме с импульсным модулирующим сигналом

Роман Мусий, Наталия Мельник

Численно проанализированы термонапряженное состояние, несущая способность и свойства контактного соединения полого биметаллического цилиндра при электромагнитном воздействии в режиме с импульсным модулирующим сигналом в зависимости от амплитудно-частотных характеристик такого воздействия при резонансных частотах электромагнитного поля.

Отримано 02.04.17