

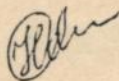
АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ

На правах рукопису

ОБІЗЬК Наталія Іванівна

ОСЕСІМЕТРИЧНІ КОЛИВАННЯ І ДИСИПАТИВНИЙ
РОЗІГРІВ ШАРУВАТИХ ЕЛЕКТРОВ'ЯЗКОПРУЖНИХ
ТІЛ ОБЕРТАННЯ

(01.02.04 - механіка деформівного твердого тіла)



Автореферат
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 1993

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00802770 (O)

Дисертація в рукопис

Робота виконана в Інституті механіки АН України

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук,
професор Карнаухов В.Г.

Офіційні опоненти – доктор технічних наук
Савченко В.Г.,
кандидат фізико-математичних наук
Борисейко В.О.

Провідна організація – Київський державний університет
ім. Т.Г.Шевченка

Захист відбудеться 25 січня 1994р. о 10⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради К 016.49.01 Інституту механіки АН України за адресою: 252057, Київ, вул.Нестерова, 3.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту механіки АН України.

Автореферат розісланий " 23 " грудня 1993р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
доктор технічних наук


В.М.Назаренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. П'єзоелектричні перетворювачі енергії у вигляді структурно-неоднорідних тіл обернення, що складаються з активних п'єзоелектричних шарів і пасивних металічних та полімерних шарів, знаходять широке застосування в багатьох галузях сучасної науки і техніки - в гідроакустиці, в машинобудуванні, радіотехніці, електроніці, в ультразвукових технологіях і ін. Активні шари перетворюють електричну енергію в механічну чи навпаки, а пасивні шари підвищують міцність елементів і являються одночасно електродами, через які підводять чи знімають електричну енергію; пасивні полімерні шари (наприклад, гумові шари, різного типу клеї і т.п.) ізолюють п'єзоелементи від зовнішнього середовища або скріплюють шари один з одним. Крім того, пасивні шари використовують для утворення несиметрії в товщинному напрямі, що приводить до збудження згинних коливань. З цієї ж метю використовуються і п'єзоелектричні шари з протилежним напрямком поляризації. Цей ефект широко використовується при конструюванні п'єзоперетворювачів, що працюють на згинних модах, особливо при виготовленні гідрофонів - приймачів звуку. Активні слої можуть бути кристалічними, керамічними або полімерними. Зараз полімерні п'єзоматеріали і композити на їх основі широко застосовуються в техніці. Розроблені композити, основою яких є гума, а наповнювачами - поляризована кераміка. При гармонічному електромеханічному навантаженні, яке є одним з найбільш розповсюджених видів навантаження п'єзоелементів, особливе значення мають дисипативні властивості п'єзоматеріалів і здатність поглинати електромеханічну енергію. Врахування дисипативних властивостей надзвичайно важливо при оцінці амплітудних значень електромеханічних величин при роботі п'єзоелементів на резонансних частотах. Дисипативні властивості п'єзоелементів приймалися до уваги в роботах А.Б.Улітко, Г.А.Коломійця, А.А.Бондаренко, Г.В.Куценко, О.М.Болкісева і ін. Дисипативні властивості металічних і полімерних матеріалів досліджено в роботах Г.С.Писаренко та його послідовників.

Перетворення електромеханічної енергії в теплову веде до значного підвищення температури п'єзоелементів, що є одним з

основних обмежень потужності п'єзоперетворювачів внаслідок можливої деполяризації п'єзоматеріалу і впливу температури на електромеханічні властивості матеріалу. При досягненні температурою дисипативного розігріву точки Кюрі матеріал деполяризується і губить свої функціональні властивості. Підвищення температури суттєво прискорює процес руйнування п'єзоелементів.

Математичне моделювання коливань та дисипативного розігріву п'єзоелементів може бути виконано на основі результатів, одержаних В.Г.Карнауховим та його співробітниками в області електротермов'язкопружності.

При врахуванні залежності електромеханічних властивостей від температури вивчення термомеханічних процесів при коливаннях п'єзоелементів зводиться до складних нелінійних крайових задач, розв'язування яких зустрічають великі математичні труднощі. Навіть для найпростіших одномірних задач неможливо знайти аналітичний розв'язок таких задач. Мають, найбільш ефективними і перспективними являються чисельні методи, зокрема, метод скінченних елементів.

Незважаючи на значну кількість робіт, що відносяться до теорії і практичної реалізації методу скінченних елементів стосовно електропружних середовищ (роботи Н.Алік, Т.Д.Р.Нугез, Д.Вочер, М.Лагьєр, С.Маєрфелд, У.Кагава, Т.Ямабучі, К.Кенані, С.П.Ковальова, В.А.Кузьменко, Г.Г.Писаренко, В.М.Чушко, К.П.Рагульскиса, Р.А.Бараускаса, Г.П.Кульвеца і др.), роботи, пов'язані з реалізацією методу скінченних елементів для дослідження коливань та дисипативного розігріву непружних шаруватих п'єзоелектричних тіл, відсутні.

М е т а р о б о т и :

- спрощена постановка задач про коливання та дисипативний розігрів шаруватих в'язкопружних п'єзоелектричних тіл з врахуванням залежності електромеханічних властивостей матеріалу від температури;
- розробка алгоритму розв'язання таких задач і реалізація цього алгоритму на основі методу скінченних елементів;
- дослідження осесиметричних коливань і температури дисипативного розігріву в'язкопружних п'єзоелектричних тіл обертання з метою вивчення впливу різних факторів (геометрія тіл, частота, граничні умови, структурна неоднорідність тіл і т.д.)

на розподіл температури, механічних та електричних величин;
 оцінка ефективності роботи електромеханічних перетворювачів енергії шаруватої структури.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в розробці ефективного методу розв'язання задач термоелектров'язкопружності для шаруватих тіл в просторовій постановці; в розв'язанні ряду конкретних задач і в дослідженні впливу різних факторів на термомеханічну поведінку шаруватих п'єзоелектричних тіл обертавання.

Достовірність одержаних результатів гарантується використанням обґрунтованих моделей термомеханічної поведінки п'єзоелектричних матеріалів і кінцевоелементних методів розв'язку зв'язаних задач для елементів з таких матеріалів; контролем точності розрахунків; узгодженням з розв'язками, що одержані іншими чисельними чи аналітичними методами.

Практична цінність. Запропонований метод розв'язання зв'язаних задач термоелектров'язкопружності шаруватих тіл може бути використаний в розрахунковій практиці науково-дослідних і проектно-конструкторських організацій для прогнозування динамічної поведінки п'єзоелектричних перетворювачів в машинобудуванні, автоматичі, роботобудуванні, обчислювальній техніці, радіотехніці, електроніці і т.п.

Дослідження, що проведені в дисертаційній роботі, являються складовою частиною науково-дослідної роботи відділу термопружності Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка АН України по темі № 135 "Розробка аналітичних та чисельних методів дослідження нелінійних електромеханічних коливань та дисипативного розігріву в'язкопружних тіл" (№ ДР 01910010361).

Апробація роботи. Матеріали дисертації доповідались на наукових семінарах відділу термопружності Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка АН України (Київ, 1992, 1993рр.), на III Всесоюзній конференції з механіки неоднорідних структур (Львів, 1991р.), на 17 і 18 конференціях молодих вчених Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка АН України (1992, 1993рр.), на семінарі по напрямку "Механіка зв'язаних полів в матеріалах і елементах конструкцій" Інституту механіки ім. С.П.Тимошенка АН України (1993р.), на проблемному семінарі з механіки механіко-математичного факультету Київського держуніверситету (1993р.).

П у б л і к а ц і я . Матеріали дисертації опубліковані в роботах /1-3/. Одна робота подана до друку /4/.

С т р у к т у р а і о б ' є м р о б о т и . Дисертаційна робота складається з вступу, трьох глав, закінчення і списку літератури, який вміщує 120 найменувань. Загальний об'єм дисертації 149 сторінок, включаючи 57 малюнків.

Автор висловлює глибоку вдячність своєму науковому керівникові доктору фіз.-мат.наук, професору Карнаухову В.Г. за постійну увагу до роботи.

ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі дається короткий огляд літератури, обґрунтовується актуальність досліджень коливань і дисипативного розігріву шаруватих п'єзоелементів, актуальність розробки методу скінченних елементів для цих досліджень. Сформульована мета роботи і коротко викладено зміст дисертації.

В першій главі наведені універсальні співвідношення механіки, термодинаміки і електродинаміки: закон збереження маси, імпульсу, моменту імпульса, перший і другий закони термодинаміки, рівняння Максвелла в нерелятивістському наближенні. Другий закон термодинаміки сформульовано у вигляді нерівності Клаузіуса-Дюгема. Наведені вирази для пондеромоторних сил і моментів, потужності притоку енергії від електромагнітного поля до тіла. Розглянуто матеріали з затухаючою пам'яттю. Розглянуто основні співвідношення для в'язкопружних матеріалів з поляризацією, але без намагнічування. На основі методів Бубнова-Гальоркіна та гармонічної лінеаризації одержані визначальні рівняння електротермов'язкопружності для гармонічного електромеханічного навантаження. Представлена наближена постановка задачі про гармонічні коливання та дисипативний розігрів шаруватих п'єзоелементів з врахуванням залежності властивостей матеріалів від температури. При цьому враховується можливість розігріву металічних або полімерних шарів.

Задача про термомеханічну поведінку шаруватих п'єзоелементів зводиться до розв'язку такої крайової задачі для шару з п'єзоматеріалу відносно амплітуд електромеханічних змінних

$$f = \{ \sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, u_i, E_i, D_i, V, t_i, u_i^0, \sigma^e, V_0 \} = f' + i f''$$

і усередненої за період температури $\frac{2\pi}{\omega}$

$$T = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \theta dt :$$

рівняння руху, електростатики і енергії

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} + \rho \omega^2 u_i &= 0, \\ D_{j,j} &= 0, \quad E_i = -V_{,i}, \\ \rho c \dot{T} &= (\lambda_{ij} T_{,j})_{,i} + D, \end{aligned} \quad (1)$$

де

$$D = \frac{\omega}{2} [\sigma_{ij}'' \varepsilon_{ij}' - \sigma_{ij}' \varepsilon_{ij}'' - D_j'' E_j' + D_j' E_j'']; \quad (2)$$

визначальні рівняння

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} - e_{kij} E_k, \quad D_j = e_{jik} \varepsilon_{ik} + \mu_{ji}^S E_i, \quad (3)$$

де

$$g = \{c_{ijkl}, e_{ijk}, \mu_{ij}^S\} = g'(\varepsilon_{ij}'', E_i'', T) + i g''(\varepsilon_{ij}'', E_i'', T);$$

співвідношення Коші

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}); \quad (4)$$

механічні, електричні, теплові граничні умови

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} n_j &= t_i \quad \text{на } S_\sigma, \quad u_i = u_i^0 \quad \text{на } S_u, \\ D_i n_i &= -\sigma^e \quad \text{на } S_e, \quad V = V_0 \quad \text{на } S_v, \\ -\lambda_{ij} T_{,j} n_i &= \alpha_T (T - T_c) \quad \text{на } S; \end{aligned} \quad (5)$$

початкова умова

$$T = T_0, \quad t = 0. \quad (6)$$

Умови неперервності на поверхнях контакту двох п'єзоелектричних шарів

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^{(m)} n_i &= \sigma_{ij}^{(m+1)} n_i, \quad u_k^{(m)} = u_k^{(m+1)}, \\ D_n^{(m)} &= D_n^{(m+1)}, \quad V^{(m)} = V^{(m+1)}, \\ T^{(m)} &= T^{(m+1)}, \quad \lambda_{k\ell}^{(m)} T_{,\ell} n_k = \lambda_{k\ell}^{(m+1)} T_{,\ell} n_k. \end{aligned} \quad (7)$$

Механічні і теплові умови на поверхні контакту п'єзоелектричного і металічного шарів зберігають вигляд (7), на пасивному металічному шарі потенціал постійний по всій поверхні шару, при цьому він може бути або невідомим, або заданим.

При підведенні до металічного шару струму гранична умова має вигляд

$$\int_{S_i} \sigma^e ds = Q_i, \quad V = V_c, \quad (8)$$

де Q_i - заданий заряд на цьому провіднику, V_c - невідоме значення потенціалу.

При контакті п'єзоелектричного шару з полімерним (наприклад, гумовим) останній розглядається як ізотропний діелектрик і умови на поверхні контакту зберігають вигляд (7).

Дійсні величини визначаються за формулою

$$\operatorname{Re}(f e^{i\omega t}) = f' \cos \omega t - f'' \sin \omega t. \quad (9)$$

Наведена система рівнянь є суттєво нелінійною із-за залежності властивостей матеріалу від температури та зв'язаності електромеханічних і теплових полів.

Якщо коефіцієнти визначальних рівнянь постійні, то задача зводиться до розв'язку двох незалежних лінійних задач, коли спочатку розраховують електромеханічний стан тіла, а потім знаходиться дисипативна функція (2) і розв'язується рівняння теплопровідності з відомим джерелом тепла.

Друга глава присвячена розробці алгоритму розв'язання задач про коливання та дисипативний розігрів шаруватих тіл обертання, коли властивості матеріалу залежать від температури, та його реалізації на основі методу скінченних елементів при осесиметричному електромеханічному навантаженні. Лінеаризація системи визначальних рівнянь досягається методом покрокового інтегрування в часі. Лінійні крайові задачі електров'язкопружності і теплопровідності на кожному кроці в часі розв'язуються методом скінченних елементів, для чого використовується варіаційне формулювання цих задач. Варіаційна постановка задачі для окремо взятого шару має вигляд:

$$\delta \mathcal{J} = 0, \quad \delta I = 0, \quad (10)$$

де

$$\partial = \frac{1}{2} \int_V (c_{ijkl} \epsilon_{ij} \epsilon_{kl} - 2 e_{ijk} E_i E_{jk} - \mu_{ij}^3 E_i E_j - \rho \omega^2 u_k u_k) dV - \int_S (t_k u_k - \sigma^e V) dS. \quad (11)$$

$$I = \frac{1}{2} \int_V (\lambda_{ij} T_{,i} T_{,j} + 2 \int_{T_0}^T \rho c_T \dot{T} dT - 2 \Pi T) dV + \frac{1}{2} \int_S \alpha_T (T - 2 T_c) T dS. \quad (12)$$

В загальному випадку осесиметричної деформації тіла обертання в (II) міститься десять комплексних модулів c_{ijkl} , вісім п'єзомодулів e_{ijk} і три діелектричні проникливості μ_{ij} , які знаходяться за відомими формулами перетворення тензорів через характеристики трансверсально-ізотропного матеріалу і кути між головними напрямками і координатними осями.

Дискретизація меридіонального перерізу тіла обертання проводиться ізопараметричними чотирикутними елементами з квадратичною апроксимацією шуканих величин. В межах кожного елемента переміщення в циліндричній системі координат w , u , електричний потенціал V і температура T апроксимуються виразами

$$w = \sum_{i=1}^8 \varphi_i w_i; \quad u = \sum_{i=1}^8 \varphi_i u_i; \quad V = \sum_{i=1}^8 \varphi_i V_i; \quad T = \sum_{i=1}^8 \varphi_i T_i, \quad (13)$$

де

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{1}{4} (1-\xi)(1-\eta)(-\xi-\eta-1), \quad \varphi_2 = \frac{1}{4} (1+\xi)(1-\eta)(\xi-\eta-1), \\ \varphi_3 &= \frac{1}{4} (1+\xi)(1+\eta)(\xi+\eta-1), \quad \varphi_4 = \frac{1}{4} (1-\xi)(1+\eta)(-\xi+\eta-1), \\ \varphi_5 &= \frac{1}{2} (1-\xi^2)(1-\eta), \quad \varphi_6 = \frac{1}{2} (1-\eta^2)(1+\xi), \quad \varphi_7 = \frac{1}{2} (1-\xi^2)(1+\eta), \\ \varphi_8 &= \frac{1}{2} (1-\eta^2)(1-\xi), \quad \sum_{i=1}^8 \varphi_i = 1, \quad -1 \leq \xi, \eta \leq 1. \end{aligned}$$

w_i , u_i , V_i , T_i - значення величин у вузлах.

Якщо тіло виготовлено з декількох різних матеріалів, то приймаємо, що в межах кожного елемента задаються фізико-механічні характеристики тільки одного із матеріалів. При цьому виконуються умови ідеального механічного контакту.

Умови стаціонарності функціоналу (II) приводять до комплексної системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно значень переміщень і електричного потенціалу у вузлах

$$\frac{\partial \mathcal{J}}{\partial w_i} = \sum_{m=1}^M \frac{\partial \mathcal{J}_m}{\partial w_i} = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{J}}{\partial u_i} = \sum_{m=1}^M \frac{\partial \mathcal{J}_m}{\partial u_i} = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{J}}{\partial V_i} = \sum_{m=1}^M \frac{\partial \mathcal{J}_m}{\partial V_i} = 0. \quad (14)$$

Для розв'язання задачі теплопровідності методом скінченних елементів використовується в поєднанні з неявною різницевою схемою, яка приводить до дійсної системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно температури у вузлах в наступні моменти часу.

Вище вказані системи розв'язуються методом Гауса без вибору головного елемента.

При формулюванні матриць елементів використовуються квадратні формули Гауса-Лехандра з восьмома точками інтегрування. Деформація ϵ_{ij} , напруження σ_{ij} , напруженість E_i і індукція

D_i електричного поля визначаються в точках інтегрування з наступною екстраполяцією на інші точки елемента. З зв'язку з тим, що визначення цих величин і дисипативної функції (2) в точках інтегрування характеризуються найбільшою точністю, при розв'язанні задачі теплопровідності ці точки вибирались такими ж, як і при розв'язанні задачі електропружності.

Для знаходження резонансних частот реалізований алгоритм розв'язання узагальненої задачі на власні значення

$$(\bar{K} - \lambda M) X = 0, \quad (15)$$

де \bar{K} , M - матриці "жорсткості" і мас задачі про вільні коливання електропружного тіла. Алгоритм побудований на розрахунку визначника

$$\det(\bar{K} - \lambda M)$$

і на методі хорд.

Необхідна точність обчислень досягалась підбором відповідної густоти розбивки, величини кроку по часу і контролювалась перевіркою виконання натуральних граничних умов.

Ефективність перетворення енергії п'єзоелементом як на резонансних, так і на нерезонансних частотах електропружних коливань може бути оцінена по величині K_d динамічного коефіцієнту електропружного зв'язку (КЕМЗ), який визначається згідно з енергетичним підходом А.Ф.Улітка. При розв'язанні

задачі електропружності за допомогою методу скінченних елементів знаходження КЕМЗ згідно з цим підходом зводиться до виразів

$$K_d^2 = \frac{K^2}{1+K^2}, \quad K^2 = \frac{(\varrho_0 - C_E V_0) C_E^{-1}}{2U - C_E V_0^2}, \quad (16)$$

де V_0 , ϱ_0 , U - різниця потенціалів на електродах, заряд електрода і внутрішня енергія. Величина C_E являється ємністю п'єзоелемента при нульових деформаціях ("загальмованого п'єзоелемента") і визначається із розв'язку задачі чистої електростатики.

В роботах Михайленка В.В. одержані співвідношення

$$K_d^2 = \frac{K^2}{1+K^2}, \quad K^2 = \frac{(\varrho_0 - C_E \Delta V)^2 C_E^{-1}}{4U_T - C_E (\Delta V)^2}, \quad (17)$$

де U_T - середня за період коливань внутрішня енергія в об'ємі п'єзоелемента. Ці співвідношення дозволяють спростити методику енергетичного підходу А.Б.Улітка для знаходження K_d в задачах електропружних коливань п'єзоелектричних тіл. Знаючи C_E , величину K_d можна знайти за формулами (17) прямо із розв'язку задачі електропружності. При безпосередньому використанні методики енергетичного підходу А.Б.Улітка для знаходження K_d наряду з основною задачею електропружності необхідно розв'язати ще дві додаткові задачі для електричного потенціалу при розімкнутих і короткозамкнутих електродах, і ці задачі розв'язувати для кожного значення частоти навантаження.

Для знаходження КЕМЗ у випадку, коли необхідно враховувати втрати в п'єзоматеріалі, пропонується використовувати такі співвідношення

$$K_d^2 = \frac{K^2}{1+K^2}, \quad K^2 = \frac{|\bar{\varrho}_0 - \bar{C}_E \Delta \bar{V}|^2}{4U_T - C'_E |\Delta \bar{V}|^2} \cdot \frac{C'_E}{|\bar{C}_E|^2}, \quad (18)$$

в яких $\Delta \bar{V} = \Delta V' + i \Delta V''$, $\varrho = \varrho'_0 + i \varrho''_0$ - комплексні амплітуди різниці потенціалів на електродах і заряду електрода відповідно, $\bar{C}_E = C'_E + i C''_E$ - комплексна ємність п'єзоелемента, яка визначається із задачі електростатики при врахуванні діелектричних втрат, а за міру середньої накопиченої за період електромеханічної енергії в об'ємі п'єзоелемента U_T вибирається величина $\int U_T dV$, де

$$U_T = \frac{1}{2} \langle \bar{b}_{ij} \varepsilon_{ij} + E_j \bar{D}_j \rangle, \quad \langle \cdot \rangle = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} (\cdot) dt, \quad (19)$$

$$f = \{ \bar{b}_{ij}, \varepsilon_{ij}, E_j, \bar{D}_j \} = f' \cos \omega t - f'' \sin \omega t.$$

Для кількісної оцінки дисипативних властивостей п'єзоматеріалу і затухання коливань використовується величина Ψ , яка є відношенням електромеханічної енергії, дисипованої в матеріалі за період коливань, до подвійного середнього наближеного значення енергії, що накопичується за період. В термінах комплексних амплітуд величина Ψ має вигляд

$$\Psi = 2\pi \frac{\text{Im}(\bar{b}_{ij} \bar{\varepsilon}_{ij} + E_i \bar{D}_i)}{\text{Re}(\bar{b}_{ij} \bar{\varepsilon}_{ij} + E_i \bar{D}_i)}. \quad (20)$$

В кінці глави описано спрощений підхід до розв'язання задач для шаруватих тіл, які складаються з активних (п'єзоелектричних) і пасивних (металічних або полімерних) шарів. При цьому підході замість металічного шару вводиться діелектричний шар, покладається рівними нулю п'єзоефіцієнти e_{ijk} для відповідного п'єзокерамічного шару, його жорсткісні коефіцієнти c_{ijkl} приймаються рівними жорсткісним коефіцієнтам металу, а діелектричні проникливості ε_{ij} збільшуються на декілька порядків порівняно з їх величинами в суміжних п'єзокерамічних шарах. Порівняння результатів, отриманих при такому підході для задачі про визначення невідомого електричного потенціалу на металічному шарі в тришаровій пластині, з результатами, одержаними за допомогою точного підходу практично співпадають.

В третій главі на основі розробленого підходу представлені розв'язки ряду нових задач термоелектров'язкопружності для шаруватих тіл обертавання. При розв'язанні задач з урахуванням залежності властивостей матеріалу від температури використовувались результати експериментальних робіт по вивченню температурних залежностей електромеханічних характеристик п'єзокераміки ЦТС_ТБС-2, одержаних у відділі електропружності Інституту механіки АН України.

В цій главі наведені результати дослідження впливу структурної неоднорідності на частоти, форми коливань, коефіцієнт затухання (КЗ) і КЕМЗ, а також на розподіл електромеханічних

та теплових польових величин у шаруватих елементах. Досліджувався вплив процентного вмісту металу на частоти власних коливань конуса, один із шарів якого – металічний, а другий – п'єзокерамічний. Конус отримуємо в результаті обертання прямокутника, одна із вершин якого знаходиться на постійній відстані від осі обертання (рис.1). Обертаючи прямокутник навколо цієї точки, отримуємо різні конуси зі змінним кутом конусності α .

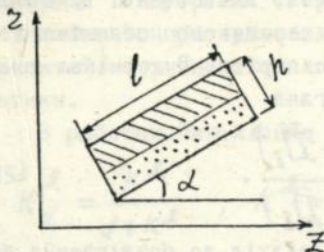


Рис.1

Сам прямокутник може складатися із шарів з різними електромеханічними і тепловими характеристиками. Коливання збуджуються гармонічною різницею потенціалів $\Delta V e^{i\omega t}$, яка підводиться до електродованої кінцевої поверхні. Зважається, що

попередня поляризація спрямована по товщині конуса. По всій поверхні здійснюється конвективний теплообмін з навколишнім середовищем. Механічні властивості металу, який розглядається як ізотропний в'язкопружний матеріал, приймається такими

$$C_{11} = C_{11}' (1 + i \operatorname{tg} \delta), \quad C_{12} = C_{12}' (1 + i \operatorname{tg} \delta),$$

$$\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3,$$

де $C_{11}' = 10,32 \cdot 10^{10} \text{ Н/кг}^2$, $C_{12}' = 5,44 \cdot 10^{10} \text{ Н/кг}^2$, $\operatorname{tg} \delta = 0,15 \cdot 10^{-4}$.

Матеріал п'єзоелектричного шару – п'єзокераміка ЦТС_ТЕС-2, яка також розглядалась як в'язкопружний анізотропний матеріал.

Досліджувався вплив процентного вмісту металу на зміну перших чотирьох власних частот для різних кутів конусності $\alpha = 30^\circ, 40^\circ, 30^\circ, 10^\circ$. У всіх випадках частоти ростуть зі збільшенням процентного вмісту металу. Для середніх кутів конусності криві розподіляються рівномірно, а з наближенням до граничних випадків (шаруватих диска і циліндра) рівномірність порушується.

На рис.2 показана залежність перших шести власних частот від процентного вмісту п'єзокераміки для шаруватого диску зі структуров метал-п'єзокераміка.

На рис.3 зображена також залежність для перших чотирьох власних частот шаруватого циліндра.

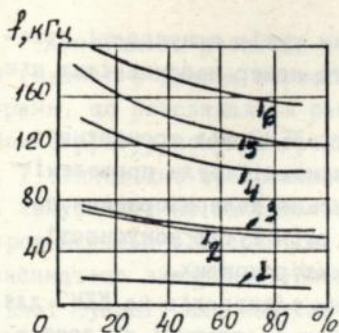


Рис.2

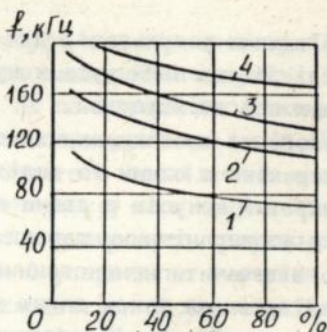


Рис.3

Для шаруватого диска криві 1, 3, 4, 6 відповідають згинним модам, які не збуджуються при відсутності металу, а криві 2, 5 – відповідно першій та другій планарним модам. У всіх випадках при наявності металу згинні та планарні моди являються зв'язаними. Для шаруватого циліндра моди 1 і 3 асоціюються з відповідно протиіфазною і синіфазною модами, а 2 і 4 – відповідно зі згинними модами.

Аналогічні дослідження були проведені для двошарового конуса, який складався по товщині з двох шарів протилежно поляризованої п'єзокераміки. Для цього випадку, на відміну від попереднього, потрібно відзначити немонотонний характер кривих залежності власних частот від процентного вмісту п'єзокераміки з одним фіксованим напрямком поляризації.

Були проведені також дослідження впливу структурної неоднорідності на КЕМЗ для двошарових конусів зі структурами: метал-п'єзокераміка і п'єзокераміка-п'єзокераміка. При цьому кожен КЕМЗ відповідав розглянутим раніше модам і висновки робились з урахуванням цієї відповідності. Було вивчено вплив процентного вмісту металу на поведінку КЕМЗ зі змінюваними кутами конусності. Так, для шаруватого диску згинні моди посилюються зі збільшенням процентного вмісту металу, а планарні моди слабо реагують на цей фактор. Найбільш п'єзоактивною є перша (планарна) мода, а для шаруватого циліндра – третя (синіфазна) мода. Так само, для циліндра має місце незначний вплив процентного вмісту металу на протиіфазну і синіфазну моди, а також підсилення згинних мод зі зростанням процентного вмісту металу.

Порівняння результатів для різних кутів конусності показує, що зі збільшенням кута конусності номер найсильніших п'єзоактивних мод зменшується.

Аналогічні дослідження залежності КЕМЗ від процентного вмісту кераміки з одним із видів поляризації були проведені для двошарових конусів з двома протилежно поляризованими по товщині п'єзокерамічними шарами. Для всіх кутів конусності потрібно відзначити немонотонний характер кривих.

Досліджувався також вплив товщини електродів на КЕМЗ для диска з двома протилежно поляризованими по товщині п'єзокерамічними шарами для перших трьох згинних мод. Зроблено висновок, що зі збільшенням товщини електродів ефективність згинних мод зменшується.

В роботі вивчено вплив структурної неоднорідності на коефіцієнт затухання для різних кутів конусності. Розрахунки проводились для тих самих елементів, що і раніше. Для конусів з такою ж структурою і різними кутами конусності досліджено вплив структурної неоднорідності на напружено-деформований, електричний та тепловий стан тіла обертання у вигляді двошарового конуса. Для конуса зі структурою метал-п'єзокераміка вміст металу дорівнював 20%.

Був розглянутий розподіл напруження як по товщині, так і вздовж меридіану. Як приклад, на рис. 4, 5 для двошарового диску зі структурою метал-п'єзокераміка показано зміну напружень σ_z'' , σ_φ'' відповідно по товщині в середньому по радіусу перерізу відповідно для першої і другої мод.

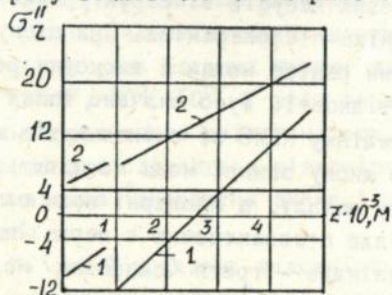


Рис. 4

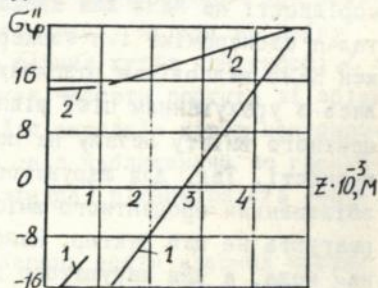
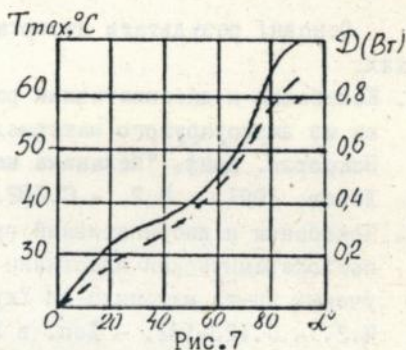
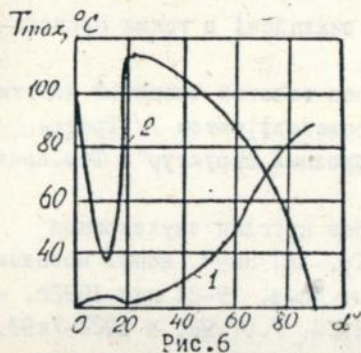


Рис. 5

Як видно з малюнків, напруження мають один порядок і в точці контакту шарів терплять розрив.

Досліджено розподіл температури дисипативного розігріву по товщині і вздовж меридіану для двохшарових конусів зі структурами, що розглядалися раніше. Як показують дослідження, для обох структур конусів градієнт температури невеликий. На рис. 6, 7 відповідно представлені результати дослідження впливу кута конусності на максимальну температуру для конуса зі структурою метал-п'єзокераміка, а також вплив кута конусності на максимальне значення температури і усереднене значення дисипативної функції для конуса, що складається з двох протилежно поляризованих по товщині п'єзокерамік. На рис.6 дослідження проводились відповідно для 2-ої і 3-ої резонансних частот.



Досліджено температурно-частотну залежність для випадку, коли властивості матеріалу залежать від температури. Зрахування залежності електромеханічних властивостей матеріалу від температури приводить до нелінійної характеристики м'якого типу.

В закінченні сформульовані основні результати дисертаційної роботи:

1. Дана спрощена постановка задач про коливання та дисипативний розігрів шаруватих в'язкопружних п'єзокерамічних тіл з врахуванням залежності електромеханічних властивостей матеріалу від температури.
2. Розроблено алгоритми розв'язку таких задач.
3. Цей алгоритм реалізовано на основі методу скінченних елементів для шаруватих тіл обертання довільного меридіального перерізу при осесиметричних електромеханічних навантаженнях.

4. Розв'язано нові задачі про коливання і дисипативний розігрів шаруватих п'єзоелектричних пластин, порожнистих циліндрів і конусів.

5. Дано оцінку впливу температури дисипативного розігріву на амплітудно-частотні характеристики коливань шаруватих п'єзоелементів.

6. Досліджено вплив різних факторів (геометрії тіл, граничних умов, структурної неоднорідності і т.п.) на характер розподілу механічних, електричних і теплових величин.

7. Дано оцінку ефективності перетворення енергії і рівня її розсіювання на різних формах коливань вказаних об'єктів.

Основні результати дисертації викладені в таких публікаціях:

1. Колебания и диссипативный разогрев толстой слоистой пластинки из вязкоупругого материала с пьезоэффектом // Третья Всесоюз. конф. "Механика неоднородных структур": Тез. докл. - Львов, 1991. - Ч.2. - С.232.
2. Колебания и диссипативный разогрев круглой двухслойной пьезокерамической пластинки // Тр. ХУП Науч. конф. молодых ученых Ин-та механики АН Украины, Киев, 19-21 мая 1992г. - Ч.2. - С.123-132. - Деп. в УкрИНТЕИ, 7.07.92, № 1022-Ук92.
3. Колебания и диссипативный разогрев биморфного пьезокерамического полого цилиндра // Тр. ХУШ Науч. конф. молодых ученых Ин-та механики АН Украины, Киев, 13-21 мая 1993г. - Ч.1. - С.112-116. - Деп. в ГНТБ Украины, 16.03.93, № 1764-Ук93.
4. Скінченно-елементний метод дослідження коливань і дисипативного розігріву шаруватих метало-керамічних елементів // Доп. АН України. - Сер.А. - 1993 (подано до друку).

АВ 28.740

АВ 28.740