

Акустические приборы и системы

УДК 534.14:535

О.В. Богданов, канд.тех.наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Академіка Янгеля, 16, корпус 12, м. Київ, Україна, 03056.

Залежність пружних коливань пакету від коефіцієнту лінійного розширення внутрішнього шару при ФТА перетворенні

В статті встановлено залежність амплітуди та фази стаціонарного пружного коливання тонкого тришарового пакету від зміни однієї з фізичних характеристик внутрішнього шару. В рамках даної роботи проаналізовано вплив на пружні коливання коефіцієнта лінійного розширення. Зовнішні шари пакету виконані з однакового матеріалу. Постановка задачі виконана в рамках теорії незв'язаної термопружності. Отримані результати показують нелінійну залежність пружних коливань від вказаного параметру. Библ. 6, рис. 3.

Ключові слова: тришаровий пакет, фототермоакустичне (ФТА) перетворення, пружні коливання, коефіцієнт лінійного теплового розширення.

Вступ

Ефект фототермоакустичного (ФТА) перетворення знайшов застосування при дефектоскопії тонкошарових виробів, наприклад, в мікроелектроніці. З одного боку, теоретична частина питання непогано розвинута, але, на сучасному етапі, велика кількість робіт присвячені періодичному у часі ФТА перетворенню [1, 2]. Слід також зауважити, що дослідники зазвичай цікавляться лише пружно-деформованим станом на «тіньовій» поверхні об'єкта (термооптична генерація звукових хвиль [3]).

З другої сторони, в присутніх, у відкритому доступі, дослідженнях відсутній аналіз параметрів пружних коливань від певних фізичних властивостей матеріалу. Цей недолік є дуже суттєвим для задач дефектоскопії, оскільки «дефектний» внутрішній шар може відрізнитися від оточуючого матеріалу лише певними параметрами. Тому, метою є аналіз залежності пружних коливань від фізичних властивостей внутрішнього шару. В рамках даної статті, розглянуто залежність амплітуди та фази пружних коливань пакету лише від зміни

коефіцієнта лінійного теплового розширення в середньому шарі. Розуміючи, що випадок, коли в матеріалі змінюється лише одна з фізичних характеристик, є гіпотетичним, такий аналіз є доцільним як частина дослідження залежності пружних коливань при ФТА перетворенні від загальною сукупності фізичних параметрів матеріалів.

Постановка задачі

Загальна постановка задачі вже наводилася [4], проте, для зручності, нагадаємо її. Розглядається пружний тришаровий пакет (Рис. 1) на який діє амплітудо-модульований оптичний (лазерний) потік. Шари 1 та 3 представляють один той самий матеріал, а шар 2 — будемо вважати «дефектним», відмінність якого (від шарів 1 та 3) полягає у відмінності оптичного коефіцієнта поглинання.

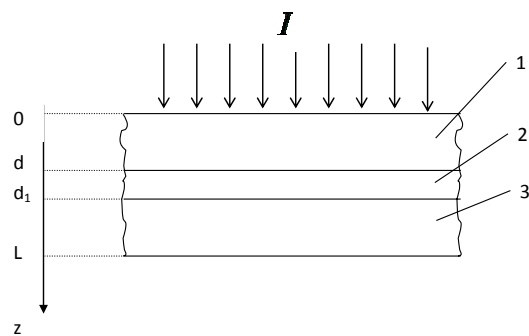


Рис. 1. Модель об'єкта дослідження

В результаті поглинання лазерного випромінювання в матеріалі об'єкта дослідження виникає неоднорідне теплове розширення шарів. Це теплове розширення, в свою чергу, викликає збудження в середовищі пружних коливань. Падіння лазерного потоку вважалось нормальним до границі розподілу повітря – пакет. Випромінювання було модульоване по інтенсивності

$$I = I_0(1 + m \cdot \cos \omega t), \quad \omega = 2\pi f,$$

де m – коефіцієнт амплітудної модуляції (дорівнює 1), f – частота амплітудної модуляції.

В випадку генерації акустичних хвиль в тришаровому пакеті, 1 та 3 шари (Рис. 1) контактують з повітрям, передбачається що немає відтоку тепла з поверхонь зазначених шарів, а теплообмін протікає лише між шарами пакету, причому при переході тепла з одного шару в інший немає стрибків температури. Також було прийнято, що процес, який збуджується, змінюється в часі по гармонійному закону, а при його описі виправдано використання рівнянь теорії незв'язаної термопружності. [4, 5]

Підсумовуючи усе раніш сказане, запишемо математичні рівняння, які описують процеси в пакеті, а також крайові умови для кожної з границь. При зроблених допущеннях вихідна система включає в себе рівняння незв'язаної теплопровідності та рівняння руху кожного з пружних шарів ($j = 1-3$ в межах всього розділу)

$$\frac{\partial^2 \theta_j}{\partial z^2} - \frac{1}{\chi_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial t} = -\frac{\beta_j G_j}{2\kappa_j} I_0 \exp(i\omega t - \beta_j z), \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 u_j}{\partial z^2} - \frac{1}{v_j^2} \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = \eta_j \alpha_j \frac{\partial \theta_j}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\sigma_j = C_j^T \frac{\partial u_j}{\partial z} - \alpha_j B_j^* \theta_j. \quad (3)$$

В приведених диференціальних рівняннях прийняті наступні позначення: θ_j – різниця між температурою речовини в збудженому стані та температурою в стані спокою; χ_j , κ_j , β_j – коефіцієнти теплопровідності, теплопровідності та оптичного поглинання, відповідно; $G_1 = 1$,

$$G_2 = \exp(-[\beta_1 - \beta_2]d),$$

$G_3 = \exp(-[\beta_1 - \beta_2]d - [\beta_2 - \beta_3]d_1)$ – коефіцієнти для вирівнювання температурного поля (щоб на границях не було стрибків температури); $\omega = 2\pi f$; u – виникаючи в шарі переміщення;

$v_j = \sqrt{\frac{\lambda_j + 2\mu_j}{\rho_j}}$ – швидкість розповсюдження

пружних поздовжніх хвиль (λ_j та μ_j – коефіцієнти Ламе, ρ_j – густина шару); α_j – коефіцієнти лінійного теплового розширення матеріалу;

$$\eta_j = \frac{B_j^*}{C_j^T}, \quad B_j^* = 3\lambda_j + 2\mu_j, \quad C_j^T = \lambda_j + 2\mu_j.$$

Крайові умови запишуться в наступному вигляді:

на границі $z = 0$

$$\kappa_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial z} = 0, \quad \sigma_1 = 0. \quad (4)$$

на границі $z = d$

$$\theta_1 = \theta_2, \quad \kappa_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial z} = \kappa_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial z}, \quad (5)$$

$$u_1 = u_2, \quad \sigma_1 = \sigma_2.$$

на границі $z = d_1$

$$\theta_2 = \theta_3, \quad \kappa_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial z} = \kappa_3 \frac{\partial \theta_3}{\partial z}, \quad (6)$$

$$u_2 = u_3, \quad \sigma_2 = \sigma_3.$$

на границі $z = L$

$$\kappa_3 \frac{\partial \theta_3}{\partial z} = 0, \quad \sigma_3 = 0. \quad (7)$$

Розв'язок задачі

Характер динамічного процесу змінюється в часі за гармонійним законом. Враховуючи те, що лазерне випромінювання генерує в середовищі пружні хвилі з частотою, рівною частоті амплітудної модуляції випромінювання [6], будемо шукати рішення у вигляді:

$$\theta(z, t) = \Theta(z) \cdot e^{i\omega t}, \quad (8)$$

$$u(z, t) = U(z) \cdot e^{i\omega t}.$$

Розв'язуючи диференціальні рівняння (1), з урахуванням крайових умов (4)-(7), отримаємо наступні розв'язки для температурного поля в тришаровому пакеті

$$\Theta_j = \left(\begin{array}{l} C_{4j-3} \cdot \exp[-\rho_{1j}z] + \\ + C_{4j-2} \cdot \exp[\rho_{1j}z] \end{array} \right) + \quad (9)$$

$$+ S_{1j} \cdot \exp[-\beta_j z],$$

де $C_1 - C_{14}$ постійні інтегрування,

$$\rho_{1j} = \sqrt{\frac{\omega}{2\chi_j}}(1+i), \quad S_{1j} = \frac{\beta_j G_j I_0}{2\kappa_j(\rho_{1j}^2 - \beta_j^2)}.$$

Підставляючи (6) в рівняння (1) знаходимо розв'язок для переміщень пружного тришарового пакету:

$$U_j = \left(\begin{array}{l} -C_{4j-3} \cdot \exp[-\rho_{1j}z] + \\ + C_{4j-2} \cdot \exp[\rho_{1j}z] \end{array} \right) \cdot M_{1j} +$$

$$+ \left(\begin{array}{l} C_{4j-1} \cdot \exp[-\rho_{2j}z] + \\ + C_{4j} \cdot \exp[\rho_{2j}z] \end{array} \right) - \quad (10)$$

$$- S_{2j} \cdot \exp[-\beta_j z],$$

$$\text{де } M_{1j} = \frac{\alpha_j \eta_j \cdot p_{1j}}{p_{1j}^2 - p_{2j}^2}, \quad p_{2j} = \frac{i\omega}{v_j},$$

$$S_{2j} = \frac{\alpha_j \beta_j \eta_j \cdot S_{1j}}{\beta_j^2 - p_{2j}^2}. \text{ Використовуючи отримані}$$

результати (9) та (10) знайдемо формули які описують теплові потоки та механічні напруги в шарах тришарового пружного пакету, підставляючи (9) та (10) в (3):

$$\kappa_j \frac{\partial \Theta_j}{\partial z} = \left(\begin{array}{l} -C_{4j-3} \cdot \exp[-p_{1j}z] + \\ + C_{4j-2} \cdot \exp[p_{1j}z] \end{array} \right) \cdot M_{2j} - S_{3j} \cdot \exp[-\beta_j z],$$

$$\sigma_j^{\text{оп}} = \left(\begin{array}{l} C_{4j-3} \cdot \exp[-p_{1j}z] + \\ + C_{4j-2} \cdot \exp[p_{1j}z] \end{array} \right) \cdot M_{3j} - \left(\begin{array}{l} C_{4j-1} \cdot \exp[-p_{2j}z] - \\ - C_{4j} \cdot \exp[p_{2j}z] \end{array} \right) \cdot M_{4j} + S_{4j} \cdot \exp[-\beta_j z],$$

$$\text{де } M_{2j} = \kappa_j \cdot p_{1j}, \quad S_{3j} = \beta_j \kappa_j \cdot S_{1j},$$

$$M_{3j} = -\alpha_j B_j^* \frac{p_{2j}^2}{p_{2j}^2 - p_{1j}^2}, \quad M_{4j} = C_j^T \cdot p_{2j},$$

$$S_{4j} = \frac{\alpha_j B_j^* p_{2j}^2}{p_{2j}^2 - \beta_j^2} \cdot S_{1j}. [4]$$

Чисельні результати

Фізичні властивості шарів 1 та 3 (Рис. 1) обираємо рівними властивостям кремнію, оскільки саме цей матеріал є базовим для побудови сучасних мікросхем: $\alpha = 2,33 \cdot 10^{-6}$ м/град, $\kappa = 156$ Вт/м, $\beta = 1,2 \cdot 10^6$ м⁻¹, $\chi = 8,8 \cdot 10^{-5}$ град/с, $v = 8,43 \cdot 10^3$ м/с, $E = 10^{11}$ Па, $\nu = 0,27$. Для математичного моделювання було обрано випадок, коли коефіцієнт лінійного теплового розширення другого шару може відрізнитися на порядок, як менше, так і в більшу сторону. [6]

Результати чисельного дослідження для амплітудної модуляції оптичного випромінювання з частотами 100 Гц та 500 Гц представлені на Рис. 2; на Рис. 3 частоти амплітудної модуляції становили 1 кГц та 5 кГц.

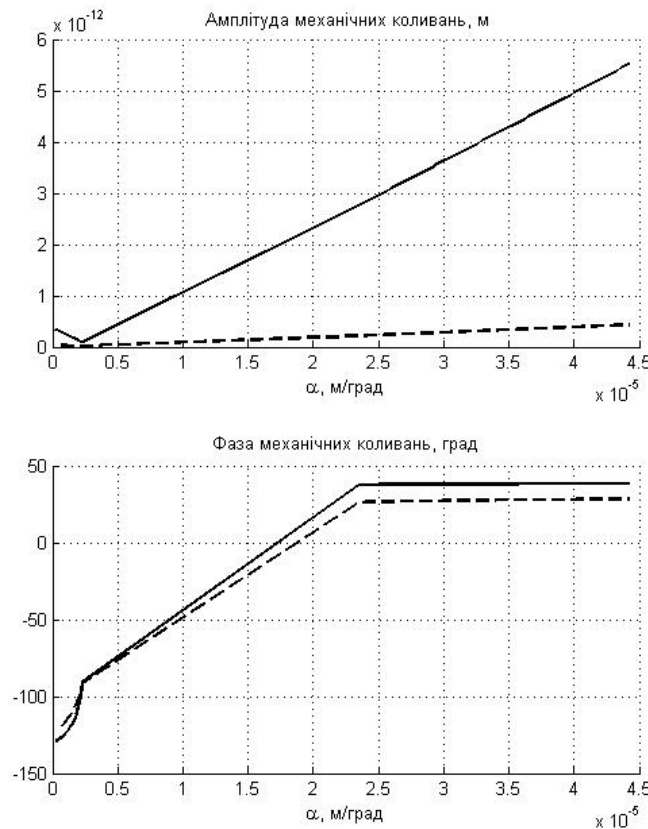


Рис. 2. Частоти амплітудної модуляції «-» – 100 Гц та «-» – 500 Гц

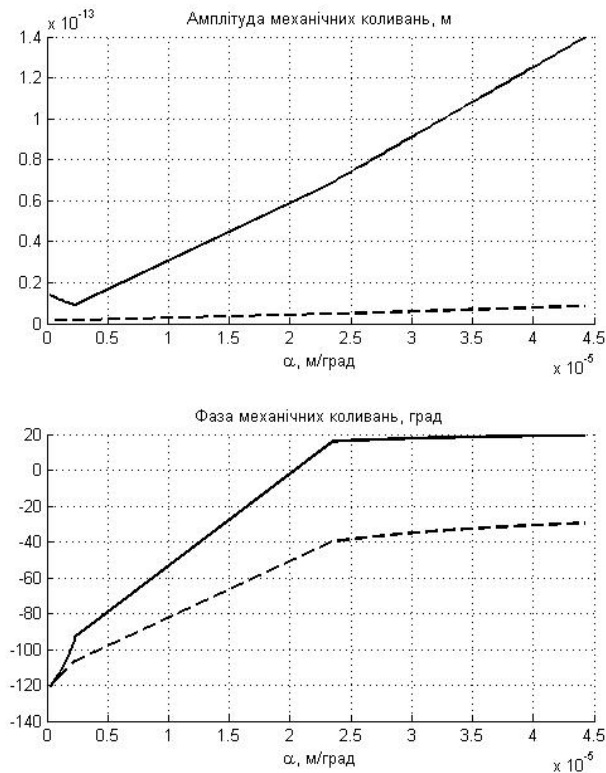


Рис. 3. Частоти амплітудної модуляції «-» – 1 кГц та «- -» – 5 кГц

З наведених кривих на Рис. 2 та Рис. 3, бачимо, що характер залежності пружних коливань, від зміни значення коефіцієнта лінійного теплового розширення, має суттєво нелінійний вигляд. Особливістю залежності амплітуди пружних коливань від частоти коливань (в межах частотного діапазону дослідження) є зміна лише амплітуди, а характер кривою залишається таким самим.

При деяких значеннях коефіцієнта α ми спостерігаємо перегини в графіках. Слід зазначити, що положення точки перегину не залежить від частоти пружних коливань. Особливо сильно змінюється фаза пружних коливань. Цей факт вказує на шлях реєстрації відмінності коефіцієнта оптичного поглинання під час ФТА дефектоскопії.

Висновки

У статті розглянуто залежність амплітуди та фази пружних коливань від зміни коефіцієнта лінійного теплового розширення внутрішнього шару пружного тришарового пакету. Отримані результати показали не лінійність залежностей, що розглядалися. Показано, що зміну коефіцієнта лінійного теплового розширення можна реєструвати як по амплітуді, так і по фазі пружних коливань.

Список використаних джерел

1. Коваленко А. Д. Термоупругость. — К.: Вища школа, 1975. — 216 с.
2. Корнаухов В. Г. Тепловое разрушение полимерных элементов конструкций при моногармоническом деформировании // Прикладная механика. — 2004. — Т. 40, № 6. — с. 30–70.
3. Лямшев Л. М. Лазерное термооптическое возбуждение звука / Отв. ред. В. И. Ильичев; АН СССР, Акустический институт им. Н. Н. Андреева — М.: Наука, 1989. — 237 с.
4. Бабаев А. Э. Термооптическое возбуждение четырехслойного пакета, содержащего электроупругий элемент / Бабаев А. Э., Савин В. Г., Богданов А. В. Сотников А. В. // Электроника и связь. — 2002. — №15. — с. 20–24
5. Гузь А. Н. Дифракция упругих волн в многосвязных телах. / Гузь А. Н., Головчан В. Т.— К.: Наукова думка, 1972. — 254 с.
6. Кикоин И. К. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. акад. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976, — 1008 с.

Поступила в редакцию 15 октября 2014 г.

УДК 534.14: 535

А.В. Богданов, канд.тех.наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
ул. Академика Янгеля, 16, корпус 12, г. Киев, Украина, 03056.

Зависимость упругих колебаний пакета от коэффициента линейного расширения внутреннего слоя при ФТА преобразовании

В статье установлена зависимость амплитуды и фазы стационарного упругого колебания тонкого трехслойного пакета от изменения одного из физических характеристик внутреннего слоя. В рамках данной работы проанализировано влияние на упругие колебания коэффициента линейного расширения. Внешние слои пакета выполнены из одинакового материала. Постановка задачи выполнена в рамках теории несвязанной термоупругости. Полученные результаты показывают нелинейную зависимость упругих колебаний от указанного параметра. Библ. 6, рис.3.

Ключевые слова: *трехслойный пакет, фототермоакустическое (ФТА) преобразование, упругие колебания, коэффициент линейного теплового расширения.*

UDC 534.14: 535

O.V. Bogdanov, Ph.D.

National technical university of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
st. Academician Yangel'ya 16, Building 12, m. Kyiv, Ukraine, 03056.

Dependence of elastic waves package of coefficient of linear expansion of the inner layer at PTA transformation

In the article, the dependence of the amplitude and phase of the steady-state oscillations of a thin elastic three-layer package of changes in one of the physical characteristics of the inner layer. In this paper analyzed the effect on the elastic vibrations of coefficient of linear expansion. The outer layers of the package are made of the same material. Statement of the problem is made in the framework of the theory of thermoelasticity unrelated. The results show a nonlinear dependence of the elastic vibrations of the specified parameter. Ref. 6, Fig. 3.

Keywords: *three-layer package, PTA transformation, elastic vibrations, the coefficient of linear thermal expansion.*

References

1. *Kovalenko A. D. (1975), "Thermoelasticity". K.: Vishcha School, P. 216. (Rus)*
2. *Kornaukhov V. G. (2004), "Thermal destruction of polymeric structural elements under monogarmicheskom deformation". Applied Mechanics. Vol. 40, No 6. Pp. 30-70. (Rus)*
3. *Lyamshev L. M. (1989), "Laser thermo-sound excitation. Ed. Ed. V.I. Il'ichev; USSR Academy of Sciences, Acoustics Institute". M.: Science, P. 237. (Rus)*
4. *Babaev A. E., Savin V. G., Bogdanov A. V., Sotnikov A. V. (2002), "Thermooptical excitement of a four pack containing electroelastic element". Electronics & Communications. No. 15. Pp. 20-24. (Rus)*
5. *Guz A. N. Golovchan V. T. (1972), "Diffraction of elastic waves in a multiply connected bodies". K.: Naukova Dumka, P. 254. (Rus)*
6. *Kikoin I. K. (1976), "Tables of physical quantities". Handbook. Ed. Acad. i. K. Kikoin. M.: Atomizdat, P.1008. (Rus)*