

УДК 534.14:535

О.В. Богданов, канд. техн. наукНаціональний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Академіка Янгеля, 16, корпус 12, м. Київ, Україна, 03056.

Залежність пружних коливань пакету від коефіцієнта Пуассона внутрішнього шару при ФТА перетворенні

В рамках даної роботи проаналізовано залежність амплітуди та фази стаціонарного пружного коливання, які виникають у тонкому тришаровому пакеті, від зміни однієї з фізичних характеристик внутрішнього шару. Розглянуто вплив на пружні коливання коефіцієнта Пуассона. 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. Бібл. 6, рис. 3.

Ключові слова: тришаровий пакет; фототермоакустичне (ФТА) перетворення; пружні коливання; коефіцієнт Пуассона.

Вступ

Фототермоакустичний ефект (ФТА) знаходить застосування в багатьох сферах техніки. Одним з прикладів найкращого його застосування є дефектоскопія тонкошарових виробів, наприклад, в мікроелектроніці. Це пов'язано з можливістю безконтактного збудження пружних коливань в об'єкті дослідження.

Теоретична частина цього ефекту непогано розвинута, проте, на сучасному етапі, велика кількість робіт присвячені періодичному у часі ФТА перетворенню [1, 2]. Слід також зауважити, що теоретичний аналіз, зазвичай, обмежується лише пружно-деформованим станом на «тінювій» поверхні об'єкта (термооптична генерація звукових хвиль [3]).

Слід зазначити що в присутніх, у відкритому доступі, дослідженнях не вистачає аналізу параметрів пружних коливань від зміни певних фізичних властивостей матеріалу. Цей недолік є дуже суттєвим для задач дефектоскопії, оскільки «дефектний» внутрішній шар може відрізнитися від оточуючого матеріалу лише змінною одного (або декількох) параметру. В попередніх роботах проведено аналіз, щодо впливу на коливальний процес коефіцієнтів оптичного поглинання, лінійного теплового розширення та температуропровідності. Метою цієї статті є аналіз залежності пружних коливань від зміни коефіцієнта Пуассона в середньому шарі. Розуміючи, що випадок, коли в матеріалі

змінюється лише одна з фізичних характеристик, є гіпотетичним, такий аналіз є доцільним як складова дослідження залежності пружних коливань при ФТА перетворенні від загальної 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.

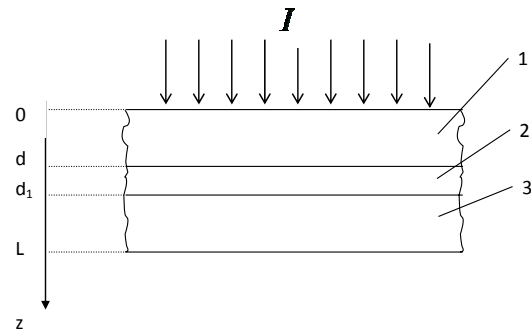


Рис. 1. Модель об'єкта дослідження

За рахунок поглинання лазерного випромінювання в матеріалі об'єкта дослідження виникає неоднорідне теплове розширення шарів. 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.

При генерації акустичних хвиль у тришаровому пакеті, 1 та 3 шари (рис.1) контактують з повітрям, передбачається що немає відтоку тепла з поверхонь зазначених шарів, а теплообмін

протикає 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, температуропровідності, 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;

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

$$C_j^T = \lambda_j + 2\mu_j.$$

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 [3], 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

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

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

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

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

Підставляючи (9) в рівняння (2) знаходимо розв'язок для переміщень пружного тришарового пакету:

$$U_j = \left(\begin{array}{l} -C_{4j-3} \cdot \exp[-p_{1j}z] + \\ + C_{4j-2} \cdot \exp[p_{1j}z] \end{array} \right) \cdot M_{1j} + \quad (10)$$

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

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

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

$$S_{2j} = \frac{\alpha_j \beta_j \eta_j \cdot S_{1j}}{\beta_j^2 - \rho_{2j}^2}$$

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):

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

$$\sigma_j^\omega = \left(\begin{matrix} C_{4j-3} \cdot \exp[-\rho_{1j} z] + \\ + C_{4j-2} \cdot \exp[\rho_{1j} z] \end{matrix} \right) \cdot M_{3j} - \left(\begin{matrix} C_{4j-1} \cdot \exp[-\rho_{2j} z] - \\ - C_{4j} \cdot \exp[\rho_{2j} z] \end{matrix} \right) \cdot M_{4j} + S_{4j} \cdot \exp[-\beta_j z],$$

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

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

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

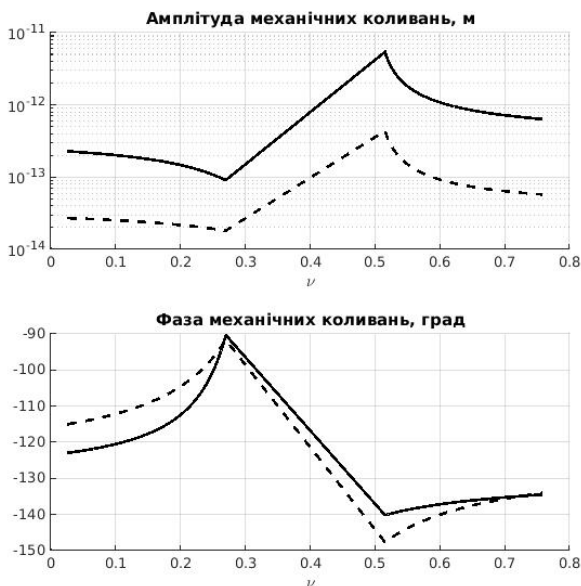


Рис. 2. Частоти амплітудної модуляції «-» – 100 Гц та «- -» – 500 Гц

Чисельні результати

Фізичні властивості шарів 1 та 3 (Рис.) обираємо рівними властивостям кремнію, оскільки саме цей матеріал є базовим для побу-

дови 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, $\nu = 8,43 \cdot 10^3$ м/с, $E = 10^{11}$ Па, $\nu = 0,27$.

Для математичного моделювання було обрано випадок, коли коефіцієнт теплопровідності другого шару може відрізнятись на порядок, як менше, так і в більшу сторону. [6]

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

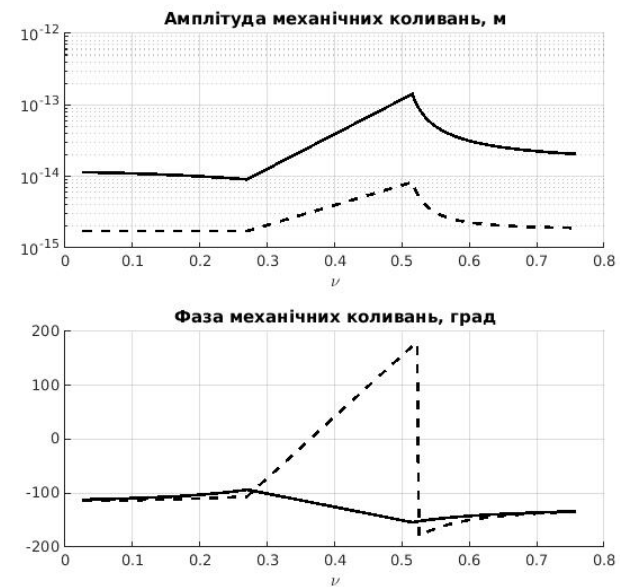


Рис. 3. Частоти амплітудної модуляції «-» – 1 кГц та «- -» – 5 кГц

З наведених кривих на **Ошибка! Источник ссылки не найден.** та Рис. , бачимо, що характер залежності пружних коливань, від зміни значення коефіцієнта Пуассону, має 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. Крім того, чітко можна побачити наявність пікового значення амплітуди пружних зміщень, в межах досліджуваного діапазону зміни коефіцієнту Пуассону.

З іншого боку фаза пружних коливань змінюється не лише в залежності від коефіцієнта Пуассона, а й в залежності від частоти коливального процесу. Цей факт вказує на шлях реєстрації відмінності коефіцієнта Пуассона під час ФТА дефектоскопії.

Висновки

У статті розглянуто залежність амплітуди та фази пружних коливань від зміни коефіцієнта Пуассона внутрішнього шару пружного тришарового пакету. Отримані результати показали нелінійність залежностей, що розглядалися. Показано, що зміну коефіцієнта Пуассона можна реєструвати як по амплітуді, так і по фазі пружних коливань, що більш інформативно.

Список використаних джерел

1. 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
2. Гузь А. Н. Дифракция упругих волн в много-связных телах. / Гузь А. Н., Головчан В. Т. — К.: Наукова думка, 1972. — 254 с.
3. Кикоин И. К. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. акад. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976, — 1008 с.
4. Коваленко А. Д. Термоупругость. — К.: Вища школа, 1975. — 216 с.
5. Корнаухов В. Г. Тепловое разрушение полимерных элементов конструкций при моногармоническом деформировании // Прикладная механика. — 2004. — Т. 40, № 6. — с. 30–70.
6. 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.

Поступила в редакцию 06 мая 2015 г.

УДК 534.14: 535

А.В. Богданов, канд. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», ул. Академика Янгеля, 16, корпус 12, г. Киев, Украина, 03056.

Зависимость упругих колебаний пакета от коэффициента Пуассона внутреннего слоя при ФТА преобразовании

В рамках данной работы проанализирована зависимость амплитуды и фазы стационарного упругого колебания, которые возникают в тонком трехслойного пакета, от изменения одного из физических характеристик внутреннего слоя. Рассмотрено влияние на упругие колебания коэффициента Пуассона. 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. Библи. 6, рис. 3.

Ключевые слова: *трехслойный пакет; фототермоакустичне (ФТА) преобразование; упругие колебания; коэффициент Пуассона.*

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.

The dependence of the elastic vibrations package of Poisson's ratio of the inner layer when converting PTA

As part of this work the dependence of the amplitude and phase of steady elastic vibrations occurring in a thin three-layer package of changes in the physical characteristics of one of the inner layer. The effect on elastic vibrations Poisson's ratio. Package outer layers are made of the same material. Problem is made in the framework of unbound thermoelasticity. The results show a nonlinear dependence of elastic waves from said parameter. Bybl. 6, Fig. 3.

Keywords: *three-layer package PTA conversion; elastic vibrations; Poisson's ratio.*

References

1. *Babaev A. E., Savin V. G., Bogdanov A. V. , Sotnikov A. V.* (2002), "Thermo-optical excitation of a four pack containing electroelastic element", *Elektronika ta zvyazok*, №15, P. 20-24. (Rus)
2. *Guz A. N., Golovchan V. T.* (1972), "Diffraction of elastic waves in a multiply connected bodies", Kiyv, Naukova Dumka, 254 p. (Rus)
3. *Kikoin I. K.* (1978), "Tables of physical quantities. Handbook", Ed. Acad. i. K. Kikoin, Moskva,: Atomizdat, 1008 p. (Rus)
4. *Kovalenko A. D.* (1975), "Thermoelasticity", Kiyv, Vishcha Shkola, 216 p. (Rus)
5. *Kornauhov V. G.* (2004), "Thermal destruction of polymeric structural elements under monogarmicheskoy deformation", *Prikladnaya Mehanika*, Vol. 40, № 6, P. 30-70. (Rus)
6. *Lyamshev L. M.* (1989), "Laser thermo-sound excitation" ,Ed. Ed. V.I. Il'ichev, USSR Akademiya Nauk, Akusticheskiy Institut N.N. Andreev, Moskva, Nauka, 237 p. (Rus)