

17. Horn, R. and Johnson, C. (1985), "Matrix Analysis", Cambridge Univ. Press.
18. Bai, Z. and Demmel, J.W. (1993), "On swapping diagonal blocks in real Schur", *Linear Algebra and Appl.*, vol. 186, pp. 73-95.
19. Brandts, J.H. (2002), "Matlab code for sorting real Schur forms", *Numer. Linear Algebra Appl.* 9, pp. 249-261.
20. Granat, R., Kågström, B. and Kressner, D. (2009), "Parallel eigenvalue reordering in real Schur forms", *Concurrency Computat.: Pract. Exper.*, 21, pp. 1225-1250.

УДК 539.3: 534.1

ДО МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАНЬ ПОВЕРХНІ ЗА ЇЇ КОМБІНОВАНИМИ ГОЛОГРАФІЧНИМИ ІНТЕРФЕРОГРАМАМИ

Селіванов Ю. М., д. т. н., с. н. с.

*Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара,
просп. Гагаріна, 72, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна*

selivanov-dnu@i.ua

Отримані формули освітленості поверхні на комбінованих голографічних інтерферограмах для випадків її сталих і нестационарних коливань, чисельно досліджено вплив параметрів коливань та умов експерименту на діапазон вимірюваних зміщень і чутливість методу в цих випадках.

Ключові слова: сталі й нестационарні коливання, комбіновані голографічні інтерферограми, вплив параметрів коливань та умов експерименту.

К МЕТОДУ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ЕЁ КОМБИНИРОВАННЫМ ГОЛОГРАФИЧЕСКИМ ИНТЕРФЕРОГРАМАМ

Селиванов Ю. М., д. т. н., с. н. с.

*Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара,
просп. Гагарина, 72, г. Днепропетровск, 49010, Украина*

selivanov-dnu@i.ua

Получены формулы освещенности поверхности на комбинированных голографических интерферограммах для случаев ее установившихся и нестационарных колебаний, численно исследовано влияние параметров колебаний и условий эксперимента на диапазон измеряемых смещений и чувствительность метода в этих случаях.

Ключевые слова: постоянные и нестационарные колебания, комбинированные голографические интерферограммы, влияние параметров колебаний и условий эксперимента.

ON METHOD FOR INVESTIGATION OF SURFACE OSCILLATIONS WITH THE USE OF COMBINED HOLOGRAPHIC INTERFEROGRAMS

Selivanov Yu. M., Dr. Sci. (Tech.)

*Dnipropetrovsk National University named Oles Honchar,
Gagarin Avenue, 72, Dnepropetrovsk, 49010, Ukraine*

selivanov-dnu@i.ua

The formulas for illuminance of surface on the combined interferograms were obtained for steady-state and non-stationary oscillations. By means of simulation, influence of oscillation parameters and experimental conditions on measurable shift range and method sensitivity was studied for the cases in question.

Important and extraordinary complicated problems of non-stationary dynamics of non-homogeneous thin-walled structures [1-3], first of all, demand experimental investigations with new quality level and, consequently, a development of measurement methodology [1-7].

In papers [8, 9] the approach to investigation of surface non-stationary displacement with the use of combined holographic interferograms was proposed. The essence of it is described further. If on the same registered media during the time $T_0 = \alpha T$ the studied surface static state is exposed and during the time $T_H = (1 - \alpha)T$ the unset state is exposed, then for the illuminance I of a point of this surface of the image reconstructed from the interferogram, the fundamental formula holds true

$$I \approx I_0 \left| \alpha + \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T(1 - \alpha)} \exp \left[-i \int_{t_0}^t (\bar{K} \cdot \bar{V}(\tau)) d\tau \right] dt \right|^2, \quad (1)$$

where I_0 – illuminance of point at stationary state; $\bar{V}(\tau)$ – velocity of the point during exposure; \bar{K} – sensitivity vector of optical scheme; α – coefficient to choice; t and τ – time; t_0 – time of exposure start; $T = T_0 + T_H$ – exposure duration; i – imaginary unit.

Substituting change law $\bar{V}(\tau)$ to (1), the specific for this law illuminance formula can be obtained. By this formula a plot is obtained, which shows the relation between displacement amplitude and the interferential band order in the point. This plot is the basis for determination of the studied surface displacement at any time of process with the use of interferogram.

Approximately, it was showed [9-11] the possibility to obtain rather strict and full data of the field of transient displacements of the surface with the use of lasers of small output radiation. Earlier these data were being obtained only using the powerful expensive laser. Nevertheless, the usage of the approach to investigate the transient oscillation demands a development of the theoretical basis.

The approach has not been used systematically as yet to investigate oscillations, with exceptions of highly oscillated harmonic ones. It needs strengthening of theoretical grounds. The present paper considers stationary (harmonic) and non-stationary (exponentially damped) surface oscillations. Formulas for surface illuminance on combined holographic interferogram were constructed.

Here by way of example of exponentially damped oscillations the formulas of surface illuminance on the combined interferogram were obtained. Two specific states were considered: a) surface of structure under the influence of direct waved front and b) surface under simultaneous influence of direct and reflected fronts. The influence of parameters of non-stationary oscillations and experimental conditions on measured displacement range and method sensitiveness in these cases was studied numerically. The following facts were proved.

Key words: steady-state and non-stationary oscillations, combined holographic interferograms, influence of oscillation parameters and experimental conditions.

ВСТУП

Тонкостінні елементи техніки, як правило, піддаються дії всіляких коливань. Численні публікації [1-3 та ін.] свідчать, що визначення їх динамічних напружено-деформованих станів (НДС), особливо за наявності неоднорідностей у параметрах форми, розподілі матеріалу і навантаження, наразі залишається надзвичайно складною проблемою. Для її глибокого всебічного розгляду і надійного вирішення необхідні, перш за все, експериментальні дослідження динаміки зазначених структур на якісно новому рівні – з використанням сучасних інтерференційно-оптичних методів вимірювань.

При оцінці НДС тонкостінних конструкцій досить ефективними можуть бути методи голографічної безконтактної інтерферометрії [4-7], які забезпечують континуальність і наочність експериментальних даних про поверхневі зміщення будь-якого походження, високу точність вимірювання. Але дослідження високоградієнтних полів зміщень, що характерні для коливань неоднорідних оболонково-пластинчастих конструктивних елементів, із застосуванням існуючої методології вимірювань стає вельми проблематичним.

У роботах [8, 9] запропоновано новий підхід до дослідження зміщень поверхні, що знаходиться у стані руху – з використанням комбінованих голографічних інтерферограм. Апробація підходу в дослідженнях термомеханічних деформацій неоднорідних оболонок [9-11] показала, що він дозволяє за допомогою поширених лазерів безперервного випромінювання невеликої вихідної потужності отримувати досить точні і повні дані про поле несталіх зміщень поверхні, які раніше вдавалося визначати лише за допомогою

двохекспозиційної голографічної інтерферометрії з використанням потужного лазера великої вартості.

Крім того підхід забезпечує регулювання чутливості до вимірюваних зміщень та їх діапазону, що має велике значення в дослідженнях несталих станів тонкостінних конструкцій із локальними особливостями в розподілі матеріалу, його характеристик і діючого навантаження. Тепер при використанні в експериментах потужного імпульсного лазера за допомогою цього підходу можна кількісно досліджувати деформаційні зсуви поверхні, що змінюються зі швидкістю до 500 м/с, тобто в діапазоні, раніше недоступному для голографічних методів.

Підхід ще не застосовувався в систематичних дослідженнях коливань, за винятком високошвидкісних гармонійних. Для цього потрібен додатковий розвиток його теоретичної бази.

Мета роботи – отримати формули освітленості поверхні на її комбінованій голографічній інтерферограмі для випадків сталих і нестационарних коливань, чисельно дослідити вплив параметрів коливань та умов експерименту на діапазон вимірюваних зміщень і чутливість методу в цих випадках.

СУТЬ МЕТОДУ КОМБІНОВАНИХ ІНТЕРФЕРОГРАМ

Якщо на одне й теж реєструє середовище протягом часу $T_0 = \alpha T$ експонується статичний стан досліджуваної поверхні і протягом часу $T_H = (1 - \alpha)T$ – її стан у русі, то для освітленості I точки цієї поверхні на зображенні, відновленому з такої інтерферограми, правильною є фундаментальна формула [9]

$$I \approx I_0 \left| \alpha + \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T(1-\alpha)} \exp \left[-i \int_{t_0}^t (\bar{K} \cdot \bar{V}(\tau)) d\tau \right] dt \right|^2, \quad (1)$$

де I_0 – освітленість точки, що спостерігається, у стаціонарному стані; $\bar{V}(\tau)$ – швидкість її руху; \bar{K} – вектор чутливості оптичної схеми; α – коефіцієнт, величина якого підбирається в діапазоні $0 \leq \alpha \leq 1$; t і τ – час; t_0 – час початку експонування; $T = T_0 + T_H$ – тривалість експозиції; i – уявна одиниця.

Підставляючи в (1) закон зміни $\bar{V}(\tau)$, можна отримати спеціальну для цього закону формулу освітленості. За цією формулою будується графік, який пов'язує амплітуду зміщення з порядком інтерференційної смуги в точці і є основою для визначення з інтерферограми зміщень досліджуваної поверхні на будь-який час.

ГАРМОНІЙНІ КОЛИВАННЯ

У цьому випадку $\bar{L}(x, y, z, t) = \bar{A}(x, y, z) \sin \omega t$, і точки зміщуються зі швидкістю $\bar{V}(\tau) = \omega \bar{A}(x, y, z) \cos \omega \tau$, де $\bar{A}(x, y, z) = \bar{A}$ – амплітуда; ω – кругова частота.

Поклавши $t_0 = 0$, маємо $\int_{t_0}^t \bar{K} \cdot \bar{V}(\tau) d\tau = \bar{K} \cdot \bar{A} \sin \omega t$, і підставляючи в (1), одержуємо

$$\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T(1-\alpha)} \exp \left[-i \int_{t_0}^t (\bar{K} \cdot \bar{V}(\tau)) d\tau \right] dt = \frac{1}{\omega T} \int_0^{T(1-\alpha)} \exp(-i\bar{K} \cdot \bar{A} \sin \omega t) \omega dt. \quad (2)$$

Позначимо $X = \bar{K} \cdot \bar{A}$, тоді, використовуючи формулу

$$\begin{aligned} \exp(-i\bar{K} \cdot \bar{A} \sin \omega t) &= \sum_{-\infty}^{\infty} J_n(\bar{K} \cdot \bar{A}) \cdot \exp(-in\omega t) = \\ &= J_0(X) + \sum_{k=1}^{\infty} [J_{2k}(X) \cdot \cos 2k\omega t - iJ_{2k-1}(X) \cdot \sin(2k-1)\omega t], \end{aligned}$$

де J_n – функція Бесселя першого роду n -го порядку, можна записати

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\omega T} \int_0^{T(1-\alpha)} \exp(-i\bar{K} \cdot \bar{A} \sin \omega t) \omega dt = \\ &= \frac{1}{\omega T} \left[J_0(X) \omega T(1-\alpha) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_{2k}(X)}{2k} \sin[2k\omega T(1-\alpha)] + \right. \\ &\quad \left. + i \frac{J_{2k-1}(X)}{2k-1} \{ \cos[(2k-1)\omega T(1-\alpha)] - 1 \} \right]. \end{aligned}$$

Якщо час експонування набагато більший від періоду коливань ($T \gg 1/\omega$), він практично складає ціле число періодів коливань ($T = 2k\pi/\omega$). Тоді при реальних величинах α й будь-яких цілих n і k мають місце рівності

$$\begin{aligned} \sin[2k\omega T(1-\alpha)] &= \sin[2\pi 2nk(1-\alpha)] = 0, \\ \cos[(2k-1)\omega T(1-\alpha)] &= \cos[2\pi n(2k-1)(1-\alpha)] = 1. \end{aligned}$$

Отже,

$$\frac{1}{\omega T} \int_0^{T(1-\alpha)} \exp(-i\bar{K} \cdot \bar{A} \sin \omega t) \omega dt = (1-\alpha) J_0(X),$$

і для освітленості відновленого зображення поверхні отримуємо

$$I \approx I_0 \left| \alpha + (1-\alpha) J_0(X) \right|^2. \quad (3)$$

З (3) при $\alpha = 0$ випливає формула для освітленості голографічного зображення поверхні, отриманої методом усереднювання в часі $I \approx I_0 \left| J_0(X) \right|^2$ [1].

Графіки функції (3), що показують залежність відносної освітленості точки поверхні від параметра X при різних значеннях коефіцієнта α , представлені на рис. 1. З цього рисунку видно, що при комбінованому експонуванні яскравість інтерференційних смуг істотно залежить від коефіцієнта α і при усіх $\alpha > 0$ вища, ніж на усередненій інтерферограмі ($\alpha = 0$). Причому максимальне число помітних порядків відповідає значенням $\alpha = 0,5 \pm 0,1$. Шляхом додаткової контрастуючої обробки інтерферограми можна ще в 2-3 рази підвищити видимість смуг вищих порядків. Діапазон величин зміщень, що вимірюються таким чином (кількість порядків смуг, що розрізняються на інтерферограмі), стає

відповідно ширшим; проте при усіх $0 < \alpha < 1$ чутливість методу до переміщень (крок смуг) знижується удвічі порівнянно з $\alpha = 0$ і залишається постійною.

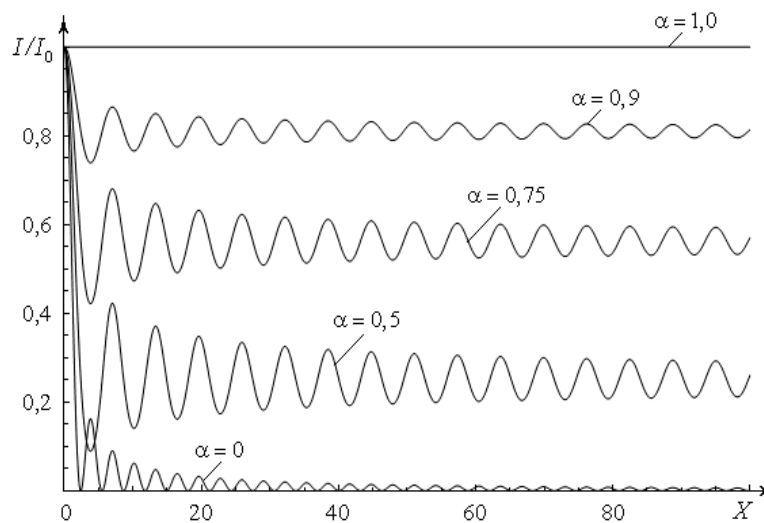


Рис. 1. Відносна освітленість точки спостережуваної поверхні при її гармонійних коливаннях на комбінованій інтерферограмі, якщо час експонування набагато більший від періоду коливань, для різних α

Якщо час експонування й період коливань співвимірні, то простого виразу для освітленості отримати не вдається, і інтегрування в (1) потрібно виконувати чисельно. Характерні графіки залежності освітленості точки на інтерферограмі від частоти коливань, отримані в такий спосіб, приведені на рис. 2.

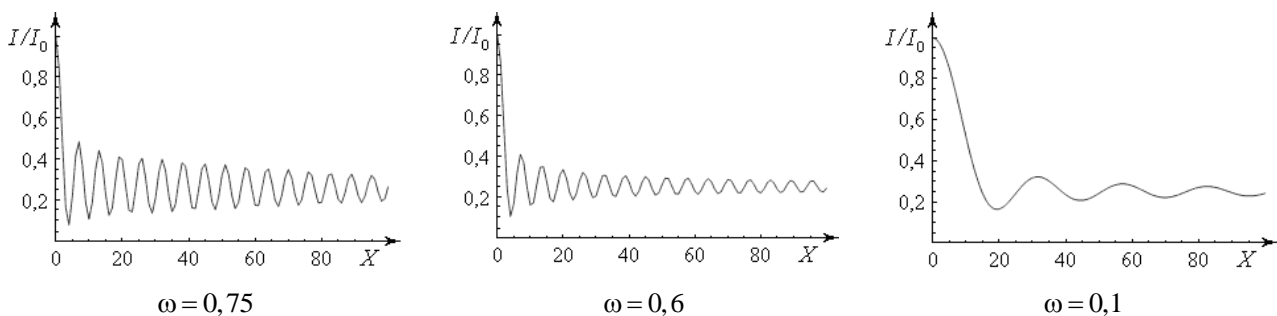


Рис. 2. Відносна освітленість точки при зменшенні частоти коливань ($\alpha = 0,5$)

З рис. 2 випливає, що зі зменшенням частоти до $\omega \approx 0,75$ залежність освітленості точки на інтерферограмі від величини X залишається практично однаковою, тобто діапазон вимірюваних зміщень і чутливість методу, притаманні високочастотним коливанням (рис. 1), не змінюються. При подальшому зменшенні частоти діапазон і чутливість починають також суттєво зменшуватися.

НЕСТАЦІОНАРНІ КОЛИВАННЯ

Нестаціонарні коливання розглянемо на прикладі експоненційно загасаючих коливань. У цьому випадку поверхня зміщується за законом $\bar{L} = \bar{A}e^{-\beta t} \sin \omega t$, тут A – амплітуда коливань; ω – колова частота; β – коефіцієнт загасання.

При дії на поверхню тільки прямого хвильового фронту її точки зміщуються зі швидкістю $\bar{V}(\tau) = \bar{A}e^{-\beta \tau} [\omega \cos \omega \tau - \beta \sin \omega \tau]$, і формула освітленості (1) набуває вигляду

$$I \approx I_0 \left| \alpha + C \int_a^b \exp(-iX e^{-\beta t} \sin \omega t) dt \right|^2, \quad (4)$$

де $C = (1/T)\exp(-iXe^{-\beta t_0} \sin \omega t_0)$; $X = \bar{K} \cdot \bar{A}$; $a = t_0$; $b = t_0 + T(1 - \alpha)$.

За формулою (4) із використанням чисельного інтегрування здійснювалося дослідження впливу параметрів коливань (ω і β) та умов експерименту (T і t_0) на діапазон вимірюваних зміщень і чутливість методу. При досить малому кроці варіювання величин ω , β , T і t_0 отримано серію графіків залежності освітленості точки від величини X . Аналіз характерних з них (рис. 3-7) показав наступне.

Зі збільшенням коефіцієнта загасання коливань на невеликих частотах діапазон зміщень розширюється, але чутливість методу знижується (рис. 3). Якщо частота коливань зростає, то зі збільшенням β діапазон звужується при незмінній чутливості (рис. 4).

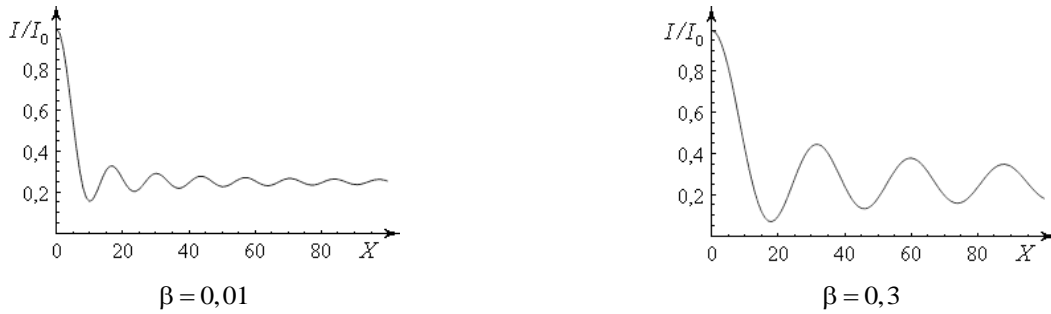


Рис. 3. Відносна освітленість точки при малому й великому значеннях β на частоті $\omega = 0,2$ ($\alpha = 0,5$; $T = 5c$; $t_0 = 0c$)

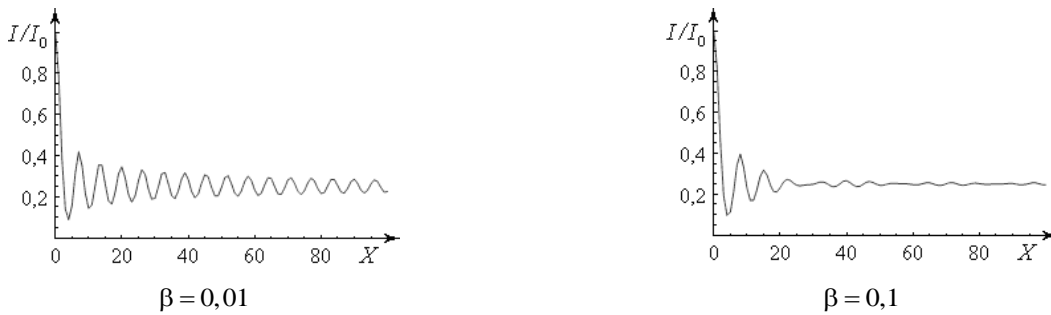


Рис. 4. Відносна освітленість точки при малому й великому значеннях β на частоті $\omega = 10$ ($\alpha = 0,5$; $T = 5c$; $t_0 = 0c$)

Зі збільшенням часу експонування при невеликих ω діапазон зміщень розширюється, чутливість методу зростає (рис. 5).

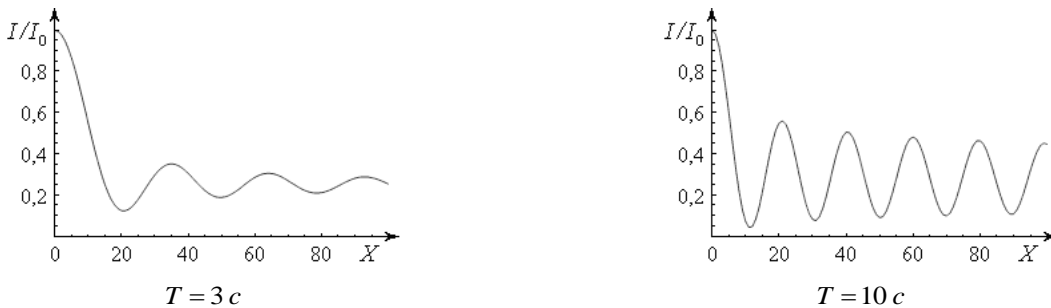


Рис. 5. Відносна освітленість точки при різних величинах T на частоті $\omega = 0,2$ ($\beta = 0,2$; $\alpha = 0,5$; $t_0 = 0c$)

При більших частотах залежність освітленості від T така ж, як і від коефіцієнта β , тобто зі збільшенням T діапазон зміщень значно звужується при незмінній чутливості методу (рис. 6). При збільшенні часу початку експонування на невеликих частотах коливань ($\omega \leq 0,6$)

чутливість істотно змінюється – спочатку різко зростає, досягаючи максимуму, потім знижується до мінімальних значень (рис. 7); тому діапазон зміщень змінюється несуттєво.

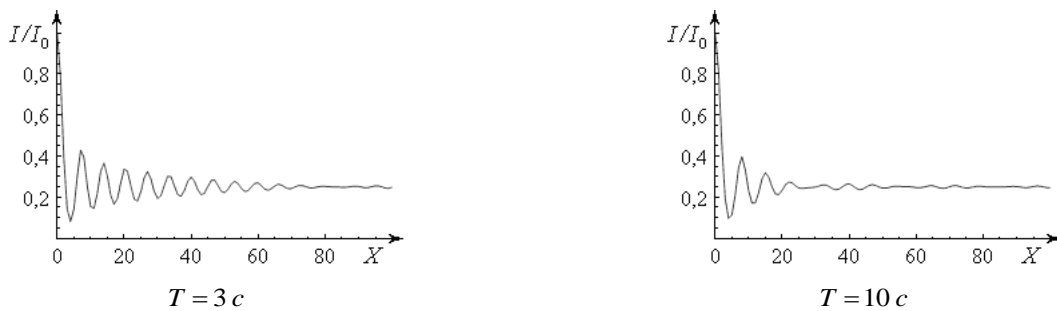


Рис. 6. Відносна освітленість точки при різних величинах T на частоті $\omega=10$ ($\beta=0,2$; $\alpha=0,5$; $t_0=0c$)

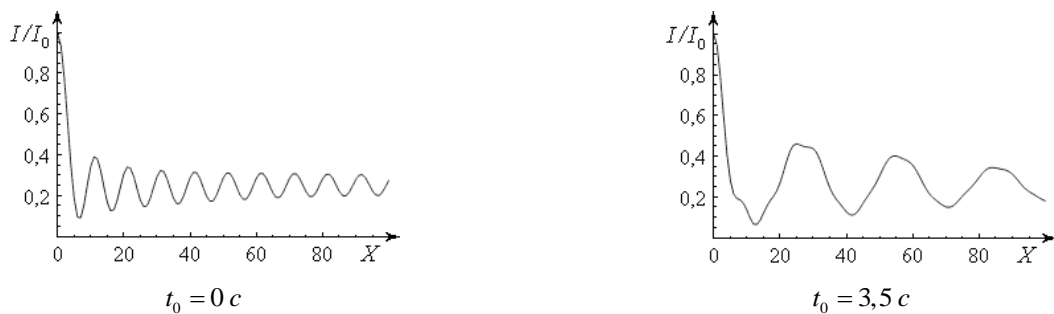


Рис. 7. Відносна освітленість точки при різних величинах t_0 ($\omega=0,6$; $\beta=0,2$; $T=10c$; $\alpha=0,5$)

Зі збільшенням частоти діапазон звужується до нуля і практично не залежить від часу t_0 ; зокрема при $\omega=10$ розрізняються лише дві смуги.

При дії на поверхню прямого і відбитого із запізненням на час t_1 хвильових фронтів векторна функція зміщень точки має вигляд $\bar{L} = \bar{A} \{ e^{-\beta t} \sin \omega t + e^{-\beta(t+t_1)} \sin \omega(t+t_1) \}$.

Для побудови графіків залежності освітленості точки на комбінованій інтерферограмі від величини X візьмемо до уваги результати роботи К. Стетсона [1]. Досліджуючи голографічним методом усереднені в часі (випадок розглядуваного підходу при $\alpha=0$) гармонійні коливання пластини одночасно на двох частотах, К. Стетсон показав, що освітленість точки на інтерферограмі поверхні, що коливається одночасно за двома і більш незалежними часовими законами, визначається добутком функцій освітленості, які характеризують окремо кожен з цих рухів.

Отже, у нашому випадку можна перемножити функції освітленості точки на комбінованій інтерферограмі, що відповідають руху поверхні під дією прямого і відбитого хвильових фронтів. Таким чином, за аналогією з (4) для освітленості точки поверхні маємо

$$I \approx I_0 \left| \alpha + C \int_a^b \exp(-iXe^{-\beta t} \sin \omega t) dt \right|^2 \times \left| \alpha + C \int_a^b \exp[-iXe^{-\beta(t+t_1)} \sin \omega(t+t_1)] dt \right|^2. \quad (5)$$

Відповідь на найбільш цікаве питання про вплив часу запізнення відбитого хвильового фронту на освітленість (5) впливає з рис. 8.

Зрозуміло, що при дії на поверхню прямого і відбитого хвильових фронтів кількість і характер інтерференційних смуг істотно залежить від часу t_1 , тобто від відстані до перешкоди і швидкості поширення реєстрованих хвиль. Зокрема, при зміні t_1 в реальному діапазоні $0c \leq t_1 \leq 45c$ інтерференційні смуги виражені вкрай слабо або взагалі відсутні, за винятком двох режимів $t_1 = 6,3c$ і $t_1 = 37,75c$, на яких спостерігається явище своєрідного

«оптичного резонансу» і виявляються смуги, що добре розрізняються. Очевидно, що кількісні дані про досліджуване поле зміщень з інтерферограми можна отримати лише у цих двох випадках.

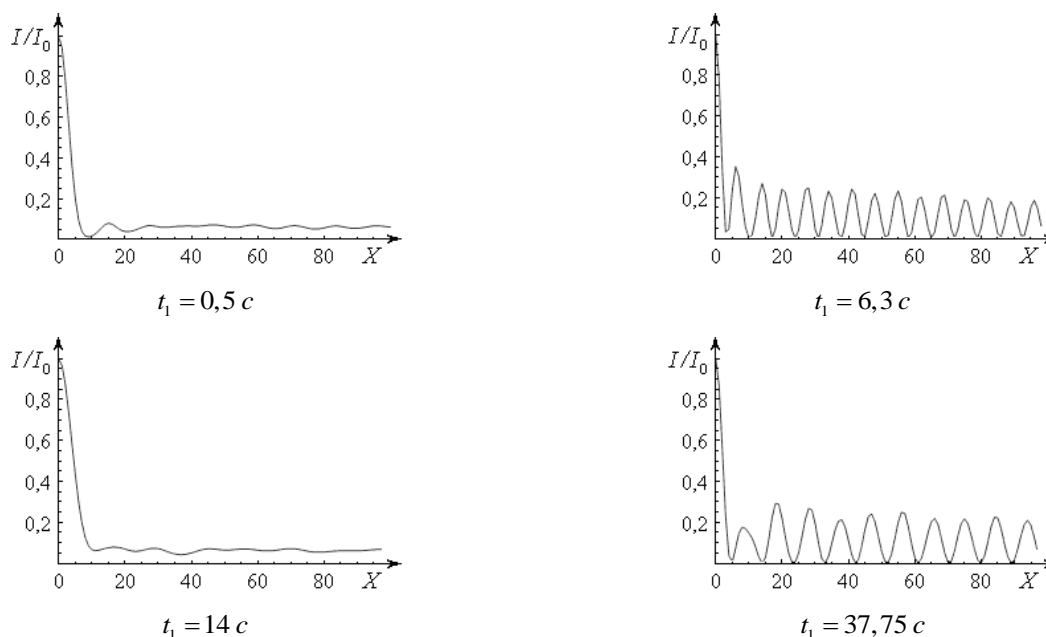


Рис. 8. Відносна освітленість точки при різних величинах t_1 ($\omega=0,2$; $\beta=0,01$; $T=10c$; $\alpha=0,5$; $t_0=0c$)

Як і при дії на поверхню лише прямого хвильового фронту, тут кількість порядків смуг, що розрізняються на інтерферограмі, можна збільшити в два рази підбором величини t_0 , але лише з області $t_0 \geq t_1$.

ВИСНОВКИ

Виконані дослідження демонструють можливості та ефективність використання комбінованих голографічних інтерферограм у дослідженнях коливань неоднорідних тонкостінних конструкцій. Зауважимо, що при цьому тип хвиль не має принципового значення. Отже, розширюється коло проблемних задач динаміки конструкцій цього класу, що вирішуються.

Отримані теоретичні дані про вплив параметрів коливань і умов голографування конструкції на результати вимірювання її зміщень можуть служити надійним обґрунтуванням при призначенні оптимальних режимів експонування інтерферограм у плануванні відповідних експериментальних робіт. Зазначений підхід, на думку автора, доцільно узагальнити на інші закони динамічного деформування тонкостінних конструкцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Заруцкий В. А. Динамические задачи и напряженно-деформируемое состояние неоднородных оболочечных структур при стационарных и нестационарных нагрузках / В.А. Заруцкий, П.З. Луговой, В.Ф. Мейш // Прикл. мех. – 2009. – Т. 45, №3. – С. 23-58.
2. Головки К. Г. Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках / К.Г. Головки, П.З. Луговой, В.Ф. Мейш ; под ред. акад. НАН Украины А.Н. Гузя. – К. : Издательско-полиграфический центр «Киевский университет», 2012. – 541 с.
3. Михайлова М. И. Задачи нестационарного взаимодействия элементов конструкций с ударными волнами / М.И. Михайлова // Прикл. механика. – 2001. – Т. 37, №10. – С. 3-23.
4. Вест Ч. Голографическая интерферометрия / Ч. Вест ; пер. с англ. – М. : Мир, 1982. – 504 с.
5. Островский Ю. И. Голографические интерференционные методы измерения деформаций / Ю.И. Островский, В.П. Щепинов, В.В. Яковлев. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 248. с.

6. Селиванов Ю. М. Голографический анализ неустановившихся деформаций сложных пластин и оболочек / Ю.М. Селиванов // Вісник Донецького університету. Сер. А : Природничі науки. – 2002. – Вип. 2. – С. 91-96.
7. Селиванов Ю. М. Исследования неустановившихся деформаций тонкостенных структур с неоднородностями голографическим методом усреднения во времени / Ю.М. Селиванов // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла : зб. наук. праць. – Д. : ІМА-прес, 2009. – Вип. 10 – С. 247-256.
8. Селиванов Ю. М. К методу определения полей неустановившихся деформационных смещений с помощью комбинированных голографических интерферограмм / Ю.М. Селиванов, А.Н. Горбань // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла : зб. наук. праць. – Вип. 7 – Д. : Наука і освіта, 2006. – С. 109-115.
9. Селиванов Ю. М. Применение комбинированных голографических интерферограмм к исследованию неустановившихся деформаций / Ю.М. Селиванов // Доп. НАН України. Сер. А. – 2007. – №6. – С. 56-60.
10. Селиванов Ю. М. Аналіз несталих деформацій складної оболонки, що локально нагрівається, за допомогою комбінованих голографічних інтерферограм / Ю.М. Селиванов // Вісник ДДУ. Сер. механіка. – 2006. – Вип. 10. У 2-х т. ; Т. 2. – С. 162-167.
11. Гудрамович В. С. Голографическое исследование деформаций цилиндрической оболочки с седловыми опорами при термомеханическом нагружении / В.С. Гудрамович, Ю.М. Селиванов, В.Г. Трошин // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла : зб. наук. праць. – Д. : Наука і освіта, 2008. – Вип. 9. – С. 61-71.

REFERENCES

1. Zarutsky, V.A., Lugovoyi, P.Z. and Meish, V.F. (2009), “Dynamical problems and stress-strain state of non-homogeneous shell structures under stationary and non-stationary loads”, *Prikladnaya mehanika*, vol. 45, no. 3, pp. 23-58.
2. Golovko, K.G., Lugovoyi, P.Z. and Meish, V.F. (2012) *Dinamika neodnorodnyih obolochek pri nestatsionarnyih nagruzkah* [Dynamics of inhomogeneous shells under non-stationary loads], edited by academician NAS of Ukraine, A.N. Guzya, Ed. print. center «Kyiv Univ.», Kyiv.
3. Mikhailova, M.I. (2001) “Problems of non-stationary interaction between structure elements and shock waves”, *Prikladnaya mehanika*, vol. 37, no. 10, pp. 3-23.
4. West, Ch. (1979), *Golograficheskaya interferometriya* [Holographic interferometry], John Wiley & Sons, New York.
5. Ostrovskij, Yu.I., Schepinov, V.P. and Yakovlev, V.V. (1988), *Golograficheskie interferentsionnyie metody izmereniya deformatsiy* [Holographical interferential methods of measurements of deformations], Nauka, Moscow.
6. Selivanov, Yu.M. (2002), “Holographic analysis of transient deformation complex plates and shells”, *Visnyk Donetskoho universytetu, Ser. A: Pryrodnychi nauky*, issue 10, pp. 91-96.
7. Selivanov, Yu.M. (2009), “An investigation of unset deformation of thin-walled constructions with inhomogeneous by holographical time-average method”, *Metody rozv'iazuvannya prykladnykh zadach mekhaniky deformivnoho tverdoho tila: zb. nauk. prats*, IMA-pres, Dnipropetrovsk, issue 10, pp. 247-256.
8. Selivanov, Yu.M. and Gorban, A.N. (2006), “To method of field determination of transient deforming displacements with use of combined holographic interferograms”, *Metody rozv'iazuvannya prykladnykh zadach mekhaniky deformivnoho tverdoho tila: zb. nauk. prats*, Nauka i osvita, Dnipropetrovsk, issue 7, pp. 109-115.
9. Selivanov, Yu.M. (2007), “An application of combined holographic interferograms to the investigation of unset deformations”, *Dop. NAN Ukraine*, no. 6, pp. 56-60.
10. Selivanov, Yu.M. (2006), “An analysis of complex shell unset deformations under heating with the use of combined holographical interferograms”, *Visnyk DDU, Ser. Mekhanika*, issue 10, vol. 2, pp. 162-167.
11. Gudramovich, V.S., Selivanov, Yu.M. and Troshin, V.G. (2008), “A holographical investigation of deformations of cylindrical shell with saddle supports under thermomechanical loading”, *Metody rozv'iazuvannya prykladnykh zadach mekhaniky deformivnoho tverdoho tila: zb. nauk. prats*, Nauka i osvita, Dnipropetrovsk, issue 9, pp. 61-71.