

Математичне моделювання фототеплових процесів для неруйнівної діагностики матеріалів

Ігор Демкович¹, Галина Петровська², Ярослав Бобицький³

¹ НУ «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, e-mail: idemkov@polynet.lviv.ua

² НУ «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, e-mail: galina_petrovska@mail.ru

³ д. т. н., професор, НУ «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013.; Інститут техніки Жешувського університету, вул. Рейтана, 16б, Жешув, Польща, 35959; e-mail: bobitski@polynet.lviv.ua

Розроблено неруйнівний високочутливий метод визначення оптичних і теплофізичних характеристик матеріалів, який базується на реєстрації фотостимульованих змін у досліджуваних зразках під дією потужного лазерного випромінювання. Для реалізації методу побудовано математичну модель, яка дозволяє числовими методами досліджувати взаємозв'язані температурні поля та відповідні їм деформації, які виникають під дією лазерного випромінювання з довільними його просторово-часовими розподілами, за урахування поверхневого й об'ємного поглинання в матеріалі, а також особливостей тепловідведення від зразка. Принцип визначення невідомого параметра полягає у тому, що експериментально реєструється теплове поле (чи поле деформацій) на поверхні опромінюваного зразка, а далі змодельоване поле температур із допомогою математичних методів оптимізації наближають до експериментально зареєстрованого. Для реєстрації теплових полів і поверхневих деформацій запропоновані оптичні схеми, які базуються на методах лазерної та спекл-інтерферометрії.

Ключові слова: фототеплова діагностика, температурне поле, поле деформацій, інтерферометрія.

Вступ. В останні роки активно розвиваються неруйнівні методи контролю, які отримали назву фототеплових [1-3]. Суть їх полягає у реєстрації фотостимульованих змін у досліджуваному зразку в результаті його освітлення потужним лазерним випромінюванням. Внаслідок поглинання частини випромінювання у зразку та навколишньому середовищі виникають теплові поля, просторово-часовий розподіл яких залежить як від параметрів лазерного випромінювання, так і характеристик матеріалу зразка. Температурні зміни призводять до виникнення різного роду фотостимульованих змін у зразку та навколишньому середовищі: інфрачервоного випромінювання, теплової лінзи у зразку та повітрі, термодформації поверхні, внутрішніх напружень тощо. Якщо ж збуджуюче випромінювання є імпульсним, то додатково виникають також акустична та тепла хвилі у зразку та повітрі.

Оскільки величина теплового відгуку залежить від характеристик матеріалу досліджуваного зразка, то фототеплові методи можуть бути використані для визначення невідомих характеристик матеріалів та елементів конструкцій, зокрема, поглинання, теплопровідності, теплоємності, густини, а також внутрішніх неоднорідностей, товщини покриття і т. д.

Основним методом інтерпретації фототеплового відгуку, зазвичай, є розв'язування оберненої задачі теплопровідності. Достовірність результатів щодо визначення невідомого параметра залежить від чутливості вимірювальних схем для реєстрації фотостимульованих змін, від математичного апарату, який повинен забезпечити найточніше відтворення умов і результатів експерименту, а також від того, наскільки точними є відомі параметри, що використовують у програмі для розрахунку.

Таким чином, існує потреба у створенні точної математичної моделі взаємодії лазерного випромінювання з досліджуваними зразками для використання в неруйнівних методах фототеплової діагностики матеріалів та елементів конструкцій, що дозволить числовими методами моделювати й інтерпретувати фототеплові зміни у досліджуваних зразках під дією лазерного випромінювання з довільними просторово-часовими розподілами, з урахуванням поверхневого й об'ємного поглинання в матеріалі, а також особливостей тепловідведення від поверхонь зразка.

1. Моделювання теплових полів і полів поверхневих деформацій

Нехай на зразок протяжністю l_x і товщиною l_y падає лазерний пучок із розподілом інтенсивності у поперечному перерізі пучка, що відповідає моді TEM_{mn} [4]. Систему взаємозв'язаних рівнянь, які за певних початкових і граничних умов описують зміну у просторі та часі полів зміщень і температури, можна записати наступним чином [5]

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \text{grad div } \vec{u} + 2 \text{grad } \mu \cdot \hat{e} + \text{grad } \lambda \text{ div } \vec{u} - \text{grad} \left[(3\lambda + 2\mu) \alpha_T (T - T_0) \right] - \rho \ddot{u} + \vec{F} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla^2 T + \frac{\omega_0}{\lambda_q} - \frac{1}{a} \dot{T} - \frac{(3\lambda + 2\mu) \alpha_T T_0}{\lambda_q} \text{div } \vec{u} = 0, \quad (2)$$

де T — температура зразка; T_0 — її початкове значення; \vec{u} — вектор зміщень; \dot{T} , \ddot{u} — похідні за часом; λ , μ — коефіцієнти Ляме; $\text{grad } \mu \cdot \hat{e}$ — скалярний добуток тензора деформації \hat{e} та вектора $\text{grad } \mu$; \vec{F} — об'ємні сили всередині зразка (джерело напружень); ω_0 — питома об'ємна потужність джерел тепла; $a = \lambda_q / c\rho$ — коефіцієнт температуропровідності; c — питома теплоємність; ρ — густина матеріалу зразка; λ_q — коефіцієнт теплопровідності; α_T — коефіцієнт теплового лінійного розширення.

Зазначимо, що рівняння (1) описує зміщення точок поверхні зразка під дією температурного поля, підпорядкованого рівнянню (2).

Якщо λ , μ , α_T є постійними величинами, а об'ємні сили $\vec{F} = 0$, то співвідношення (1) набуде вигляду

$$\mu \nabla^2 \vec{u} + (\lambda + \mu) \text{grad div } \vec{u} - \vec{F}_T - \rho \ddot{u} = 0, \quad (3)$$

де $\vec{F}_T = (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \text{grad} (T - T_0)$ — об'ємні сили, які виникають у зразку під дією температурного поля [5].

Якщо знехтувати впливом деформаційних процесів на поле температури, то рівняння (2) можна спростити

$$\nabla^2 T + \frac{\omega_0}{\lambda_q} - \frac{1}{a} \dot{T} = 0. \quad (4)$$

Таким чином, задачу будемо розв'язувати послідовно, шляхом розрахунку температурного поля на основі рівняння (4), а потім переміщень, які виникають під дією цього поля, з рівняння (3).

Температуру та переміщення у зразку під дією температурного поля визначаємо за таких граничних і початкових умов

$$\mp \lambda_q \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0}^{x=l_x} = \alpha_k (T - T_c), \quad \mp \lambda_q \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}^{y=l_y} = \alpha_k (T - T_c); \quad (5)$$

$$T|_{t=0} = T_0; \quad (6)$$

$$\mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) \Big|_{y=0}^{y=l_y} = 0,$$

$$2\mu \frac{\partial u_2}{\partial y} + \lambda \left(\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial u_2}{\partial y} \right) - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T (T - T_0) \Big|_{y=0}^{y=l_y} = 0,$$

$$u_1|_{x=0} = 0, \quad u_2|_{x=0} = 0, \quad \mu \left(\frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{\partial u_2}{\partial x} \right) \Big|_{x=l_x} = 0,$$

$$2\mu \frac{\partial u_1}{\partial x} + \lambda \left(\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial u_2}{\partial y} \right) - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T (T - T_0) \Big|_{x=l_x} = 0; \quad (7)$$

$$\vec{u}|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0 \quad (8)$$

Тут T_c — температура зовнішнього середовища; α_k — коефіцієнт тепловіддачі; u_1 , u_2 — компоненти вектора переміщень.

Питому об'ємну потужність означимо так

$$\omega_0 = I(x)k_1(y)k_2(t),$$

де $k_2(t)$ — відома часова залежність густини потужності лазерного випромінювання;

$$I(x) = I_0 \left[H_i(\xi(x)) \exp \left[- \left(\frac{\xi(x)}{\sqrt{2}} \right)^2 \right] \right]^2 = I_0 k(x) \quad \text{— просторовий розподіл густини}$$

потужності лазерного випромінювання вздовж координати x , який залежить

від індексу $i = m = n$ поперечної моди лазерного випромінювання TEM_{mn} [4]. Для осесиметричного пучка

$$I_0 = \frac{I_{сер}}{\frac{1}{l_x} \int_0^{l_x} k(x) dx}; \quad I_{сер} = \frac{P_{сер}}{S};$$

$P_{сер}$ — середня потужність випромінювання на поверхні зразка; S — опромінювана площа поверхні зразка; $H_i(\xi)$ — поліном Ерміта i -го порядку; $\xi(x) = \sqrt{2}(x - l_x/2)/r_p$.

Залежно від індексу поперечної моди i вибираємо поліном Ерміта, зокрема, для $i = 0$: $H_i(\xi) = 1$; для $i = 1$: $H_i(\xi) = 2\xi$; для $i = 2$: $H_i(\xi) = 4\xi^2 - 2$ і т. д.

$$k_1(y) = (1 - R)\alpha(y) \exp\left[-\int_0^{l_y} \alpha(\eta) d\eta\right],$$

де $\alpha(y) = \alpha_n + \alpha_0(y)$ — коефіцієнт поглинання у зразку; α_n — поглинання у поверхневому шарі; $\alpha_0(y)$ — поглинання в об'ємі матеріалу; R — коефіцієнт відбивання від поверхні зразка; η — змінна інтегрування.

Використовуючи метод скінченних різниць [6] і приймаючи, що теплофізичні коефіцієнти не залежать від температури, а також опускаючи перехід від аналітичного вигляду до різницевого, запишемо різницевий аналог рівняння (4)

$$\frac{T_{i_1, i_2}^{j+1/2} - T_{i_1, i_2}^j}{0,5\tau a} = \frac{1}{h_1^2} \left(T_{i_1+1, i_2}^{j+1/2} - 2T_{i_1, i_2}^{j+1/2} + T_{i_1-1, i_2}^{j+1/2} \right) + \frac{1}{h_2^2} \left(T_{i_1, i_2+1}^j - 2T_{i_1, i_2}^j + T_{i_1, i_2-1}^j \right) + \frac{\omega_{i_1, i_2}^j}{\lambda_q}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{T_{i_1, i_2}^{j+1} - T_{i_1, i_2}^{j+1/2}}{0,5\tau a} &= \frac{1}{h_1^2} \left(T_{i_1+1, i_2}^{j+1/2} - 2T_{i_1, i_2}^{j+1/2} + T_{i_1-1, i_2}^{j+1/2} \right) + \\ &+ \frac{1}{h_2^2} \left(T_{i_1, i_2+1}^{j+1} - 2T_{i_1, i_2}^{j+1} + T_{i_1, i_2-1}^{j+1} \right) + \frac{\omega_{i_1, i_2}^j}{\lambda_q}. \end{aligned} \quad (10)$$

Тут j — номер моменту часу; i_1, i_2 — номери просторових кроків за координатами x та y ; τ — крок за часом; h_1, h_2 — величини просторових кроків за координатами x та y . Система рівнянь (9), (10) побудована як неявна схема змінних напрямків.

Застосовуючи метод прогону, із співвідношення (10) визначаємо T_{i_1, i_2}^{j+1} через $T_{i_1, i_2}^{j+1/2}$, а із співвідношення (9) — $T_{i_1, i_2}^{j+1/2}$ через T_{i_1, i_2}^j .

Для розв'язування рівняння (3) за крайових умов (7) і (8) також використовуємо метод скінченних різниць [6, 7]. Розрахунок зміщень у зразку проводимо з використанням методу прогону на підшарах.

Запишемо різницеві аналоги рівняння (3)

$$\begin{aligned} & \frac{2\rho \left(u_{i_1, i_2}^{j+\frac{1}{2}, 1} - 2u_{i_1, i_2}^{j, 1} + u_{i_1, i_2}^{j-\frac{1}{2}, 1} \right)}{\tau^2} = \\ & = \frac{1}{h_1^2} (\lambda + 2\mu) \left(u_{i_1+1, i_2}^{j+\frac{1}{2}, 1} - 2u_{i_1, i_2}^{j+\frac{1}{2}, 1} + u_{i_1-1, i_2}^{j+\frac{1}{2}, 1} + u_{i_1+1, i_2}^{j-\frac{1}{2}, 1} - 2u_{i_1, i_2}^{j-\frac{1}{2}, 1} + u_{i_1-1, i_2}^{j-\frac{1}{2}, 1} \right) + \frac{1}{2} (\lambda + \mu) \times \\ & \times \frac{1}{h_1 h_2} \left(u_{i_1, i_2+1}^{j, 2} - 2u_{i_1, i_2}^{j, 2} + u_{i_1, i_2-1}^{j, 2} + u_{i_1+1, i_2}^{j, 2} - u_{i_1+1, i_2-1}^{j, 2} - u_{i_1-1, i_2+1}^{j, 2} + u_{i_1-1, i_2}^{j, 2} \right) + \Phi_{i_1, i_2}^{j+\frac{1}{2}, 1}, \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{2\rho \left(u_{i_1, i_2}^{j+\frac{1}{2}, 2} - 2u_{i_1, i_2}^{j, 2} + u_{i_1, i_2}^{j-\frac{1}{2}, 2} \right)}{\tau^2} = \\ & = \frac{\mu}{2h_1^2} \left(u_{i_1+1, i_2}^{j+\frac{1}{2}, 2} - 2u_{i_1, i_2}^{j+\frac{1}{2}, 2} + u_{i_1-1, i_2}^{j+\frac{1}{2}, 2} + u_{i_1+1, i_2}^{j-\frac{1}{2}, 2} - 2u_{i_1, i_2}^{j-\frac{1}{2}, 2} + u_{i_1-1, i_2}^{j-\frac{1}{2}, 2} \right) + \Phi_{i_1, i_2}^{j+\frac{1}{2}, 2}, \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{2\rho \left(u_{i_1, i_2}^{j+1, 1} - 2u_{i_1, i_2}^{j+\frac{1}{2}, 1} + u_{i_1, i_2}^{j, 1} \right)}{\tau^2} = \\ & = \frac{\mu}{2h_2^2} \left(u_{i_1, i_2+1}^{j+1, 1} - 2u_{i_1, i_2}^{j+1, 1} + u_{i_1, i_2-1}^{j+1, 1} + u_{i_1, i_2+1}^{j, 1} - 2u_{i_1, i_2}^{j, 1} + u_{i_1, i_2-1}^{j, 1} \right) + \Phi_{i_1, i_2}^{j+1, 1}, \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{2\rho \left(u_{i_1, i_2}^{j+\frac{1}{2}, 2} - 2u_{i_1, i_2}^{j, 2} + u_{i_1, i_2}^{j-\frac{1}{2}, 2} \right)}{\tau^2} = \\ & = \frac{\mu}{2h_1^2} \left(u_{i_1+1, i_2}^{j+\frac{1}{2}, 2} - 2u_{i_1, i_2}^{j+\frac{1}{2}, 2} + u_{i_1-1, i_2}^{j+\frac{1}{2}, 2} + u_{i_1+1, i_2}^{j-\frac{1}{2}, 2} - 2u_{i_1, i_2}^{j-\frac{1}{2}, 2} + u_{i_1-1, i_2}^{j-\frac{1}{2}, 2} \right) + \Phi_{i_1, i_2}^{j+\frac{1}{2}, 2}. \quad (14) \end{aligned}$$

Тут $u_{i_1, i_2}^{j, 1}$ — складова вектора переміщення за координатою x , а $u_{i_1, i_2}^{j, 2}$ — за y .

Величини $u_{i_1, i_2}^{j-1/2}$ та u_{i_1, i_2}^j відомі (u_{i_1, i_2}^j визначаємо з початкових умов), а $u_{i_1, i_2}^{j+1/2}$ та u_{i_1, i_2}^{j+1} знаходимо через $u_{i_1, i_2}^{j-1/2}$ і u_{i_1, i_2}^j методом прогону. Величини $\Phi_{i_1, i_2}^{j+1/2, 1}$, $\Phi_{i_1, i_2}^{j+1, 2}$, $\Phi_{i_1, i_2}^{j+1, 1}$, $\Phi_{i_1, i_2}^{j+1, 2}$ обчислюємо з використанням розв'язку задачі теплопровідності (4)-(6). Різницевий аналог сили $F_T = (-3\lambda + 2\mu)\alpha_T \text{grad}(T - T_0)$ запишемо так

$$\varphi_{i_1, i_2}^j = -(3\lambda + 2\mu)\alpha_T \left[\left(\frac{T_{i_1-1, i_2}^j - T_{i_1+1, i_2}^j}{2h_1} + \frac{T_{i_1, i_2-1}^j - T_{i_1, i_2+1}^j}{2h_2} \right) - \left(\frac{T_{0i_1-1, i_2} - T_{0i_1+1, i_2}}{2h_1} + \frac{T_{0i_1, i_2-1} - T_{0i_1, i_2+1}}{2h_2} \right) \right]$$

Спочатку визначаємо переміщення $u_{i_1, i_2}^{j+1/2, 1}$ з рівняння (11) і $u_{i_1, i_2}^{j+1/2, 2}$ з рівняння (12), після цього — $u_{i_1, i_2}^{j+1, 1}$ і $u_{i_1, i_2}^{j+1, 2}$ із співвідношень (13) і (14). Значення $u_{i_1, i_2}^{j+1/2}$ визначаємо через $u_{i_1, i_2}^{j-1/2}$ та u_{i_1, i_2}^j , а u_{i_1, i_2}^{j+1} через u_{i_1, i_2}^j та $u_{i_1, i_2}^{j+1/2}$. Таким чином отримуємо поля переміщень у зразку під дією температурного поля в довільний момент часу.

2. Експериментальне визначення характеристик матеріалів

Розроблена математична модель може бути використана для фототеплової діагностики оптичних і конструкційних матеріалів, оптичних елементів та елементів конструкцій, тонкоплівкових покриттів, для виявлення внутрішніх неоднорідностей тощо [8-10]. Причому, залежно від поставленої задачі необхідно застосовувати найоптимальніші схеми для реєстрації фототеплових змін у досліджуваних зразках. Зокрема, для реєстрації теплових полів і поверхневих деформацій запропоновано методи лазерної та спекл-інтерферометрії, які характеризуються високою чутливістю.

На рис. 1 наведено схему для дослідження оптичних матеріалів, прозорих у видимій області спектра. Температурні зміни, викликані поглинанням у зразку

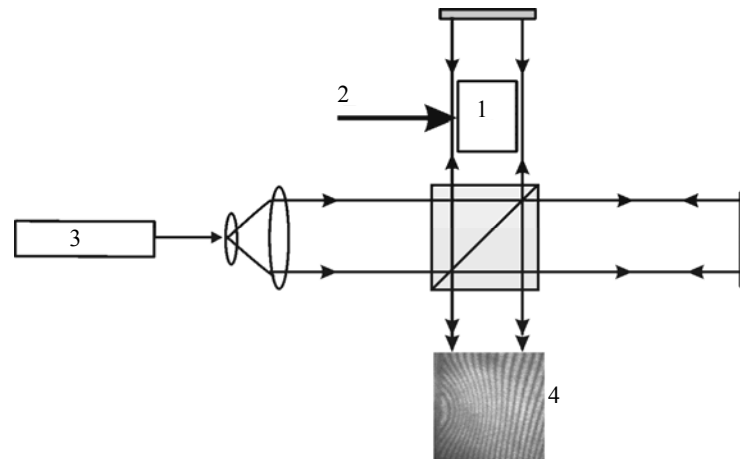


Рис. 1. Інтерферометр Майкельсона для дослідження оптичних матеріалів: 1 — зразок; 2 — пучок потужного лазера; 3 — вимірювальний He-Ne-лазера; 4 — інтерферограма

частини потужного випромінювання 2, призводять до зміни показника заломлення матеріалу. Реєстрація змін фази вимірювального лазерного променя 3, спричинених змінами показника заломлення, здійснюється з допомогою інтерферометра Майкельсона, в одне плече якого поміщають досліджуваний зразок 1. За такою схемою, зокрема, можна контролювати поглинальну здатність оптичних матеріалів [8]. При дослідженні непрозорих зразків виникає потреба у реєстрації фотостимульованих поверхневих деформацій. Для таких випадків використовували електронний кореляційний спекл-інтерферометр (рис. 2). У роботі [9] із допомогою такої схеми визначали невідомі теплофізичні характеристики конструкційних матеріалів.

Однак, слід зауважити, що визначення невідомих параметрів через зареєстровані експериментально поверхневі деформації є значно складнішою задачею порівняно з задачею визначення таких параметрів на основі експериментальних даних про зміну температурного поля. Тому в кожному конкретному випадку необхідно шукати можливості проводити інтерпретацію результатів саме через зареєстровані температурні поля. У роботі [9] запропоновано визначати розподіл температури на поверхні непрозорого зразка, який опромінюється лазерним пучком, шляхом реєстрації теплової лінзи у повітрі біля поверхні (рис. 3). Така схема, зокрема, була використана для дослідження поверхневого поглинання дзеркал і покриттів [10].

Із допомогою розробленої математичної моделі та запропонованих вимірювальних схем проведено порівняльний аналіз експериментальних результатів і результатів моделювання. На рис. 4 наведено розподіл температури та деформації поверхні резонаторного дзеркала неперервного аргонного лазера (діюча потужність 100 Вт, коефіцієнт поглинання дзеркала 0,1%, підкладка дзеркала з плавляного кварцу).

Результати моделювання співпали з зареєстрованими експериментально розподілом температури та деформаціями поверхні дзеркала в межах похибки вимірювання.

Принцип визначення невідомого параметра досліджуваного зразка полягає в тому, що експериментально реєструють теплове поле (чи поле деформацій) на поверхні, а далі з допомогою математичних методів оптимізації [11] змодельоване поле температур наближають до експериментально зареєстрованого. Для цього проводиться мінімізація цільової функції, тобто середньоквадратичного відхилення розподілу температури (чи деформації) поверхні, зареєстрованого експериментально, від отриманого внаслідок розв'язування прямої задачі моделювання

$$\Phi = \int_0^l [\Delta T_e(x) - \Delta T_t(x, p)]^2 dx.$$

Тут $\Delta T_e(x)$ — експериментально зареєстрована зміна розподілу температури на поверхні зразка в заданий момент часу; $\Delta T_t(x, p)$ — теоретично розрахована зміна розподілу температури для відповідних точок і моментів часу при певному значенні невідомого параметра p .

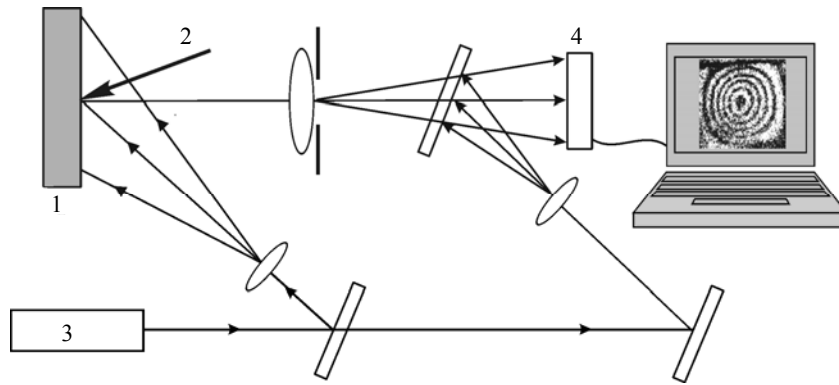


Рис. 2. Спекл-інтерферометр для реєстрації поверхневих деформацій:
1 — досліджуваний зразок, 2 — пучок потужного лазера,
3 — вимірювальний He-Ne-лазер, 4 — цифрова камера

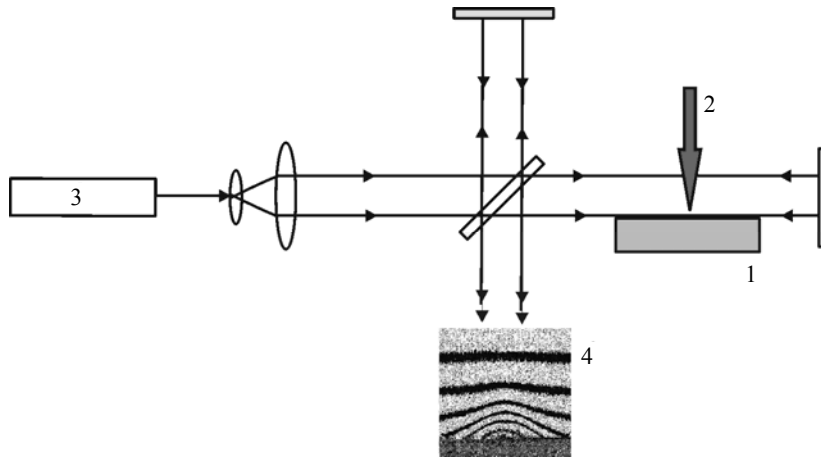


Рис. 3. Інтерферометр для реєстрації розподілу температури на поверхні досліджуваного зразка: 1 — зразок, 2 — пучок потужного лазера,
3 — вимірювальний He-Ne-лазер, 4 — інтерферограма теплової лінзи в повітрі

Оскільки для реєстрації теплових змін у зразку використані інтерферометри, то при вимірюванні фіксують фазові зміни, спричинені зміною розподілу температури. Наприклад, при використанні схеми, наведеної на рис. 3, реєструють теплову лінзу в повітрі поблизу досліджуваного зразка. Нагрівання повітря супроводжується змінами його показника заломлення, а це викликає зміни в довжині оптичного шляху променя тестуючого лазера вздовж координати x , а відтак зміни фази на величину

$$\Delta \varphi_e(x) = \frac{2\pi l}{\lambda} \gamma \int_0^l [T_2(x) - T_1(x)] dx,$$

де $T_1(x)$ і $T_2(x)$ — розподіли температур у повітрі вздовж координати x у початковий та актуальний моменти часу; l — геометрична довжина ходу променя у вимірювальному

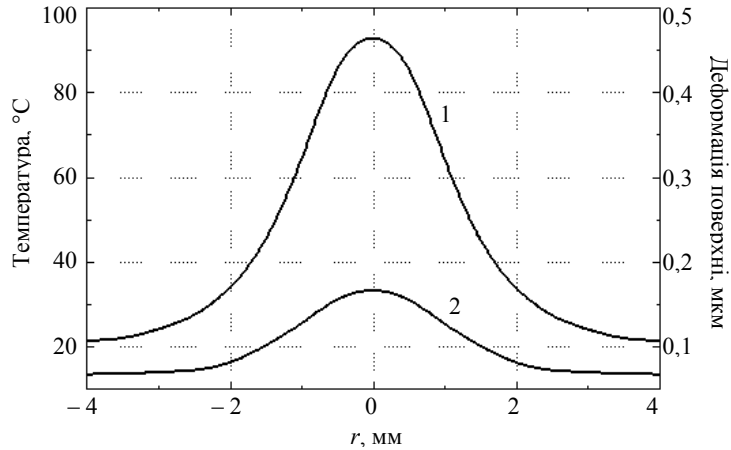


Рис. 4. Розподіл температури (крива 1) та деформації поверхні (крива 2) резонаторного дзеркала неперервного аргонного лазера

плечі інтерферометра; γ — коефіцієнт, який враховує температурний приріст показника заломлення повітря.

Якщо об'єм повітря незамкнутий і вимірювання проводяться при досягненні стаціонарного режиму, то варіаціями густини повітря можна знехтувати. Тоді зміна фази тестуючого променя при проходженні його через теплову лінзу визначається лише змінами показника заломлення повітря

$$\Delta\varphi_e(x) = -\frac{2\pi l}{\lambda} K_T (n_0 - 1) \int_0^l [T_2(x) - T_1(x)] dx,$$

де n_0 — показник заломлення повітря при температурі $T = 0^\circ\text{C}$, а K_T — температурний коефіцієнт показника заломлення (для повітря $K_T \approx 0,00367^\circ\text{C}^{-1}$).

Точність вимірювання невідомих характеристик матеріалів визначається похибками експерименту; похибками задання відомих характеристик матеріалів для моделювання; похибкою числового методу, яка, своєю чергою, залежить від величини кроків за координатами та часом, а також методу математичного наближення змодельованих полів до експериментально зареєстрованих.

Для отримання найдостовірніших результатів для кожного зразка проводиться серія вимірювань при різних енергетичних параметрах збуджуючого випромінювання. Це дозволяє отримати серію результатів щодо кожної вимірюваної характеристики з певним розкидом. Результати досліджень свідчать, що відносна похибка визначення невідомої характеристики матеріалу запропонованими методами під час реєстрації температурного поля не перевищує 1%, а у разі реєстрації поля деформації — 2-3%.

Висновки. Розроблена математична модель дозволяє числовими методами моделювати й інтерпретувати температурні поля та відповідні їм деформації, які виникають під дією потужного лазерного випромінювання з довільними його

просторово-часовими розподілами, з урахуванням поверхневого й об'ємного поглинання в матеріалі, а також особливостей тепловідведення від зразка. Створена математична модель стала основою для розробки неруйнівних фототеплових методів контролю, які базуються на методах лазерної та спекл-інтерферометрії.

Література

- [1] Shannon M. A., Rubinsky B. and Russo R. E., Detecting laser induced phase change at the surface of solids via latent heat of melting with a photothermal deflection technique // J. Appl. Phys., 75, 1473-1485 (1994).
- [2] Joochel Lee and Dongsik Kim, Photothermal methods for measuring the thermal diffusivity of microstructured materials // Proc. μ -Therm-UCB Joint Symposium, July 29, 2002.
- [3] Bialkowski Stephen E., Photothermal spectroscopy methods for chemical analysis // Department of Chemistry and Biochemistry Utah State University Logan, UT (USA) 84322-0300 Volume 134 Chemical Analysis: A Series of Monographs on Analytical Chemistry and Its Applications.
- [4] Довгий Я. О. Оптические квантовые генераторы. — К.: Вища шк., 1977. — 232 с.
- [5] Підстригач Я. С., Коляно Ю. М. та ін. Термопружність тіл при змінних коефіцієнтах тепловіддачі. — К.: Наук. думка, 1977. — 158 с.
- [6] Самарский А. А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1989. — 616 с.
- [7] Федасюк Д. В. Методи та засоби теплового проектування мікроелектронних схем. — Львів, 1999. — 227 с.
- [8] Петровська Г. А., Демкович І. В., Бобицький Я. В. та ін. Комплексний метод визначення поглинання оптичних матеріалів // Український фізичний журнал. — 2001. — Т. 46, № 8. — С. 893-898.
- [9] Petrovska G. A., Demkovych I. V., Bobitski Y. V. Photothermal method for measurement of thermal and physical parameters of construction materials // Proc. 1-st International conference on advanced optoelectronics and lasers (CAOL'2003). — Alushta, Crimea South Coast (Ukraine). — 2003. — P. 150-152.
- [10] Petrovska G. A., Demkovych I. V., Bobitski Y. V. The measurement photothermal method of mirrors covering absorption coefficient // Proc. 7-th International conference on optical technologies, optical sensors and measuring techniques OPTO 2006. — Nürnberg, Germany 2006. — P. 147-152.
- [11] Shoup Terry E. A practical guide to computer methods for engineers. — N. J.: Prentice-Hall, inc. Englewood Cliffs, 1979. — 238 p.

Mathematical modeling of photothermal processes for nondestructive diagnostics of materials

Ihor Demkovych, Halyna Petrovska, Yaroslav Bobitski

The highly sensitive non-destructive method to determine the optical and thermophysical characteristics of materials was developed. This method is based on registration of photostimulated changes in investigated samples under powerful laser emission. The interconnected mathematical model is constructed. This model allows the modeling by numerical methods of thermal fields and respective deformations, which appear under laser emission with an arbitrary space-time distributions, with account of surface and volume absorption in the material and also heat rejection from a sample. The principle of determination of the unknown parameter consists in the following:

a thermal field (or field of deformation) is registered experimentally on the surface of the illuminated sample, then the simulated field of temperatures, using optimization mathematical methods is approximated to that experimentally registered. The optical charts for experimental registration of thermal fields and surface deformations, which are based on the laser and speck interferometry are proposed.

Математическое моделирование фототепловых процессов для неразрушающей диагностики материалов

Игорь Демкович, Галина Петровская, Ярослав Бобицкий

Разработан неразрушающий высокочувствительный метод определения оптических и теплофизических характеристик материалов, базирующийся на регистрации фотостимулированных изменений в исследуемых образцах под действием мощного лазерного излучения. Для реализации метода создана математическая модель, позволяющая численными методами моделировать температурные поля и соответствующие им деформации, возникающие в исследуемых образцах под действием мощного лазерного излучения с произвольными пространственно-временными распределениями, с учетом поверхностного и объемного поглощения в материале, а также особенностей теплоотвода от образца. Принцип определения неизвестного параметра состоит в том, что экспериментально регистрируется температурное поле (или поле деформаций) на поверхности облучаемого образца, а затем смоделированное поле температур с помощью математических методов оптимизации приближают к экспериментально зарегистрированному. Для регистрации температурных полей и поверхностных деформаций предложены оптические схемы, базирующиеся на методах лазерной и спекл-интерферометрии.

Отримано 29.11.07