

УДК 621.338.27:537.221

Яценко І. В.

ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНІХ ТЕРМОДІЙ НА ПРЯМОКУТНІ ОПТИЧНІ ЕЛЕМЕНТИ ТОЧНОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

Розроблено нелінійні математичні моделі зовнішніх термодій на оптичні прямокутні елементи, що дозволяють знаходити розподіли температури та термopружних напружень по їх товщині. Визначено критичні значення параметрів зовнішніх термодій (теплових потоків, часів їх дії), перевищення яких призводить до руйнування елементів (поява тріщин, сколів та ін. дефектів) та виходу з ладу приладів на їх основі.

Ключові слова: оптичний елемент, зовнішні термічні впливи, електронний промінь.

Вступ

Сучасні прилади з оптичними елементами для вимірювання та теплового контролю об'єктів різної фізичної природи (прямокутні елементи як підкладки світлофільтрів ІЧ-приладів, лінзові аерофотографічні об'єктиви та пластини подвійної кривизни для дзеркал космічного та аерокосмічного призначення, вхідні захисні вікна та лінзи у прицілах для спостереження у видимій та ІЧ-областях спектра, напівсферичні обтічники ІЧ-приладів самонаведення та спостереження, циліндричні світловоди з оптичних моноволокон у медичних приладах для діагностики та лікування) піддаються інтенсивним зовнішнім термодіям (підвищені температури нагріву та зовнішні тиски, ударні термодії в умовах пострілу та польоту тощо) [1 – 5]. У вказаних умовах відбувається суттєва зміна властивостей поверхневих шарів оптичних елементів аж до їх руйнування (поява тріщин та сколів, глибоке поверхнєве оплавлення елементів з утворенням напливів, хвилеподібних поверхонь та зміною геометричної форми та ін. дефектів), що призводить до суттєвого погіршення техніко-експлуатаційних характеристик приладів та їх виходу з ладу.

Тому суттєвого значення набуває попередження вимушених руйнувань оптичних елементів у разі впливу зовнішніх термічних дій. Воно повинно базуватись на науково-обґрунтованих методах визначення критичних значень параметрів термічних впливів на оптичні елементи. Перевищення таких впливів призводить до передчасного руйнування даних елементів. Розробка таких методів вимагає теоретичних та експериментальних досліджень процесів нагріву оптичних елементів для різних значень зовнішніх теплових потоків та часу їх дії.

На даний час впливи зовнішньої термічної дії на оптичні елементи вивчені недостатньо: відсутні методи знаходження критичних значень параметрів зовнішніх термодій, що базуються на гранично припустимих значеннях термopружних напружень у оптичних елементах різної геометричної форми (прямокутні елементи різної товщини, циліндричні та сферичні елементи, пластини подвійної кривизни тощо) [1, 6].

Тому **метою даної роботи** є розробка нелінійних математичних моделей зовнішніх термодій на оптичні прямокутні елементи різної товщини, що враховують температурні залежності теплофізичних властивостей матеріалу (об'ємної теплоємності $C_V(T)$ та коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T)$) та дозволяють точніше знаходити критичні значення їх параметрів.

Результати досліджень та їх аналіз

Для дослідження впливу параметрів зовнішніх термодій (теплового потоку та часу його дії) на робочі поверхні елементів з оптичного скла (К8, К108, К208, БК10, ТФ110) та керамік (КО1, КО2, КО3, КО5, КО12) досліджувались прямокутні пластини розміром $2 \dots 6 \cdot 10^{-3} \text{ м} \times 3 \dots 5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \times 4 \cdot 10^{-2} \text{ м} \dots 8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, основні фізико-технічні характеристики яких можна знайти у роботах [2, 7, 8].

Для знаходження розподілів температури та термопружних напружень у розглядуваних оптичних елементах було розроблено наступні математичні моделі.

Математична модель процесу нагріву прямокутного елемента малої товщини.

Розглядаються прямокутні елементи малої товщини: $\delta \approx H$ ($\delta = 2 \cdot \sqrt{a^2 \cdot \tau}$ – глибина проникнення теплової хвилі в елемент; a^2 – коефіцієнт температуропровідності; τ – час зовнішньої теплової дії [6]), тобто проникнення теплової хвилі в елемент порівняє з його товщиною, і необхідно враховувати умови теплообміну на нижньому боці ($z = H$) його поверхні, які збігаються з умовами адіабатичності (рис. 1).

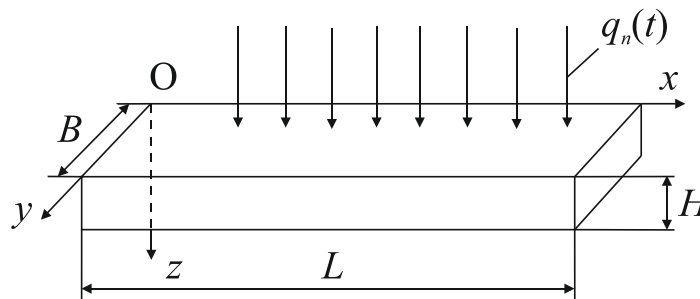


Рис. 1 – Схема нагріву оптичного прямокутного елемента різної товщини зовнішньою тепловою дією: B, H, L – ширина, товщина та довжина елемента, м; $q_n(t)$ – зовнішній тепловий потік, Вт/м²

Нехтуючи у першому наближенні зовнішніми масовими силами та радіаційними тепловтратами внаслідок їх малості (наприклад, радіаційні втрати з поверхні елемента складають не більше 3...5 % від значень зовнішніх теплових потоків, реалізованих на практиці, що поступають ззовні на його поверхню [1, 2, 6]), для знаходження розподілів температури у розглядуваних елементах маємо наступну систему нелінійних рівнянь [9, 10]:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad -\infty < x, y < +\infty, \quad 0 < z < H, \quad (1)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (2)$$

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_n(t), \quad (3)$$

$$\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0, \quad (4)$$

$$T \rightarrow T_0, \quad \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad x \rightarrow \pm\infty, \quad y \rightarrow \pm\infty, \quad \bar{q}_n(t) = \frac{\nu+1}{\lambda_0} \cdot q_n(t). \quad (5)$$

Враховуючи експериментально встановлені емпіричні залежності [2, 8]

$$C_V(T) = C_{V0} \cdot T^\nu, \quad \lambda(T) = \lambda_0 \cdot T^\nu \quad (6)$$

(C_{V0}, λ_0, ν – емпіричні константи, що залежать від природи оптичного матеріалу, $a_0^2 = \frac{\lambda_0}{C_{V0}}$) та здійснюючи заміну змінних

$$\theta = T^{\nu+1} - T_0^{\nu+1}, \quad (7)$$

отримуємо наступну лінеаризовану систему рівнянь

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_0^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (8)$$

$$\theta|_{t=0} = 0, \quad (9)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = \bar{q}_n(t), \quad (10)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0, \quad (11)$$

$$\theta \rightarrow 0, \frac{\partial \theta}{\partial x}, \frac{\partial \theta}{\partial y} \rightarrow 0 \text{ при } x \rightarrow \pm\infty, y \rightarrow \pm\infty. \quad (12)$$

Розв'язуючи задачу (8) – (12) за допомогою інтегральних перетворень Фур'є (за координатами x та y) і методу розподілу змінних (за координатою z) [9, 10], а також з урахуванням

$$q_n(t) = q_{n0} = const, \quad \text{маємо:}$$

$$T(x, y, z, t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{(\nu+1) \cdot q_{n0}}{8 \cdot \pi^2 \cdot a_0 \cdot \lambda_0} \cdot \int_0^t \frac{\left[\frac{1}{2} + \sum_{n=0}^{\infty} \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}\right) \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{H}\right)^2 \cdot (t-\tau)} \right]}{(t-\tau)^{\frac{3}{2}}} \cdot \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} e^{-\frac{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}{4a_0^2 \cdot (t-\tau)}} d\xi d\eta \right\}^{\frac{1}{\nu+1}}. \quad (13)$$

Математична модель процесу нагріву прямокутного елемента значної товщини.
Розглядаються прямокутні елементи великих розмірів: $\delta < H$, тобто маємо тривимірне температурне поле $T(x, y, z, t)$. У цьому випадку глибина проникнення теплової хвилі в елемент набагато менша за його товщину, тобто елемент можна розглядати як напівобмежене середовище в напрямку осі Oz (див. рис. 1).

Рівняння математичної моделі процесу нагріву розглядуваного елемента мають вигляд [9, 10]:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad -\infty < x, y < +\infty, z > 0, \quad (14)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (15)$$

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_n(t), \quad (16)$$

$$T \rightarrow T_0, \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \rightarrow 0 \text{ при } x \rightarrow \pm\infty, y \rightarrow \pm\infty, z \rightarrow +\infty. \quad (17)$$

З урахуванням залежностей (6), (7) маємо

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_0^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (18)$$

$$\theta|_{t=0} = 0, \quad (19)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = \bar{q}_n(x), \quad (20)$$

$$\theta \rightarrow 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x}, \frac{\partial \theta}{\partial y}, \frac{\partial \theta}{\partial z} \rightarrow 0 \text{ при } x \rightarrow \pm\infty, y \rightarrow \pm\infty, z \rightarrow +\infty, \quad (21)$$

$$\text{де} \\ \bar{q}_n(t) = \frac{\nu+1}{\lambda_0} \cdot q_n(t). \quad (22)$$

Для розв'язання задачі (18) – (21) використовуємо методи інтегральних перетворень Фур'є (за координатами x , y і z) [6, 9, 10], а також з врахуванням $q_n(t) = q_{n0} = const$, маємо:

$$T(x, y, z, t) = \left\{ T_0^{\nu+1} + \frac{(\nu+1) \cdot q_{n0}}{8 \cdot \pi^2 \cdot a_0 \cdot \lambda_0} \cdot \int_0^t \frac{d\tau}{(t-\tau)^{\frac{3}{2}}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}{4a_0^2 \cdot (t-\tau)}} d\xi d\eta \right\}^{\frac{1}{\nu+1}} \quad (23)$$

Визначення термопружних напружень у зонах максимальних зовнішніх термодій на прямокутні елементи. У точному приладобудуванні широко використовуються достатньо протяжні оптичні прямокутні елементи [2 – 5], розміри яких значно перевищують (більш, ніж на порядок) інші оптичні елементи (наприклад, лінзи, растри, волоконно-оптичні кабелі тощо). При цьому, вказані оптичні елементи в умовах зберігання або транспортування часто піддаються нерівномірним зовнішнім термодіям з утворенням так званих “небезпечних” зон, в яких тепловий потік q_n і температура T досягають своїх найбільших значень: $(q_n)_{max}$; $T_{max}(z, t) = T(x_{max}, y_{max}, z, t)$, де x_{max} , y_{max} – координати вказаних зон. Це дозволяє відразу для всієї поверхні елемента оцінювати критичні значення параметрів зовнішніх термодій (величин $(q_n)_{max}^*$ та t_{max}^*), перевищення яких призводить до виникнення у вказаних зонах на поверхні елемента граничних термопружних напружень $\sigma^*(T)$, що зумовлюють локальні руйнування його поверхневих шарів.

У випадку, що розглядається, виникнення термопружних напружень пов'язано з градієнтом температури по товщині елемента (уздовж Oz), а їх величина $\sigma_m(z, t)$ має вигляд [11, 12]:

$$\sigma_m(z, t) = \frac{\alpha_\nu \cdot E}{1-\nu} \cdot \left(-T_{max}(z, t) + \frac{2}{H^2} \cdot (2H-3z) \cdot \int_0^H T_{max}(z, t) dz - \frac{6}{H^3} \cdot (H-2z) \cdot \int_0^H z \cdot T_{max}(z, t) dz \right) \quad (24)$$

де α_ν - коефіцієнт термічного розширення, K^{-1} ; $\bar{\nu}$ - коефіцієнт Пуасона; E - модуль пружності Юнга, H/m^2 .

Температурні профілі $T_{max}(z,t)$ знаходяться з виразів (13) та (23) при $x = x_{max}$, $y = y_{max}$ (для спрощення виразів для $T_{max}(z,t)$ береться $x_{max} = 0$, $y_{max} = 0$) та $q_{n0} = (q_{n0})_{max}$.

З результатів проведених розрахунків (рис. 2 – 5) випливає, що поблизу верхнього боку прямокутних елементів різної товщини мають місце стискаючі напруги ($\sigma_m < 0$, $|\sigma_m|_{max} = 3,8 \cdot 10^7 \dots 4,2 \cdot 10^7$ Н/м² – для оптичного скла К108 та $|\sigma_m|_{max} = 1,2 \cdot 10^8 \dots 1,7 \cdot 10^8$ Н/м² – для оптичної кераміки КОЗ), а на нижньому боці – розтяжні напруги ($\sigma_m > 0$, $|\sigma_m|_{max} = 0,91 \cdot 10^7 \dots 1,4 \cdot 10^7$ Н/м² – для оптичного скла К108 та $|\sigma_m|_{max} = 0,6 \cdot 10^8 \dots 1,2 \cdot 10^8$ Н/м² – для оптичної кераміки КОЗ). При цьому ступінь впливу параметрів зовнішніх термодій наступний: збільшення часу теплової дії від $t = 3$ с до $t = 15$ с призводить до зростання $|\sigma_m|_{max}$ на 1,9...4,3 разів – для оптичного скла К108 та у 1,6...3,8 рази – для оптичної кераміки КОЗ.

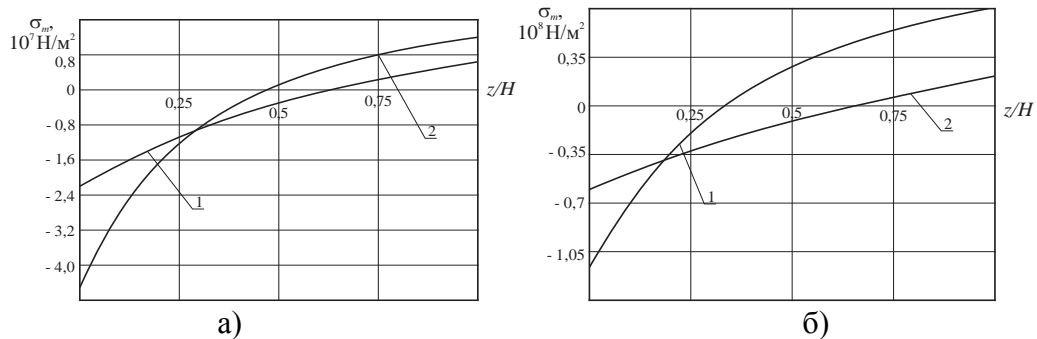


Рис. 2 – Розподіл термічних напружень по товщині прямокутного елемента з оптичного скла К108 та кераміки КОЗ залежно від зовнішнього теплового потоку q_{n0} ($T_0 = 300$ К; $t = 0,5$ с): 1 – $q_{n0} = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м²; 2 – $q_{n0} = 2,3 \cdot 10^5$ Вт/м²; а) – елемент малої товщини з оптичного скла К108; б) – елемент значної товщини з оптичної кераміки КОЗ

Встановлено, що при зміні параметрів зовнішніх термодій величина $|\sigma_m|_{max}$ може досягати критичних значень $\sigma_m^*(q_n^*, t^*)$, перевищення яких призводить до руйнування верхнього боку прямокутного елемента. При цьому збільшення t^* від 0,35 с до 1, 5 с призводить до зменшення значень q_n^* від $2,45 \cdot 10^6$ Вт/м² до $1,54 \cdot 10^6$ Вт/м² для оптичного скла К108, а збільшення t^* від 6 с до 14 с – до зменшення значень q_n^* від $2,6 \cdot 10^6$ Вт/м² до $2,15 \cdot 10^6$ Вт/м² для оптичної кераміки КОЗ.

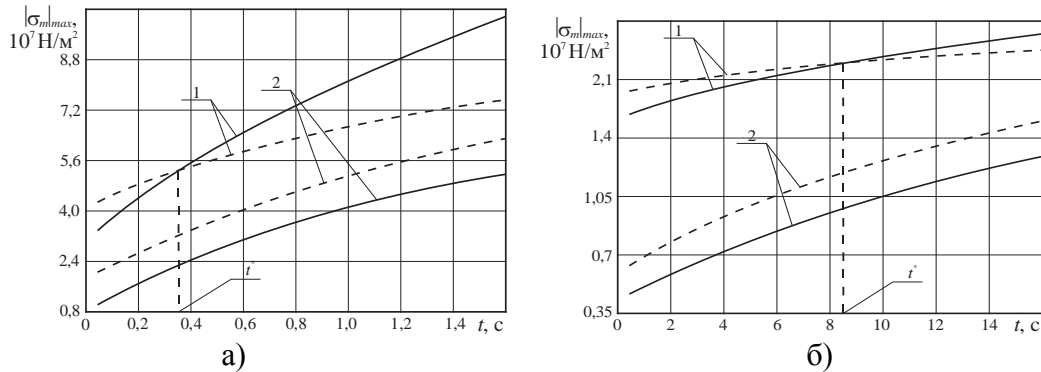


Рис. 3 – Вплив часу зовнішньої теплової дії на величину модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma_m|_{max}$ у прямокутному елементі з оптичного скла К108 та оптичної кераміки КОЗ для різних значень зовнішнього теплового потоку ($T_0 = 300$ К): 1 – $q_{n0} = 2,3 \cdot 10^6$ Вт/м²; 2 – $q_{n0} = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м²; t^* – критичний час дії, с; ——— – результати розрахунків; - - - - - межа міцності оптичного матеріалу σ^* [2, 7, 8]; а) – елемент малої товщини з оптичного скла К108; б) – елемент значної товщини з оптичної кераміки КОЗ

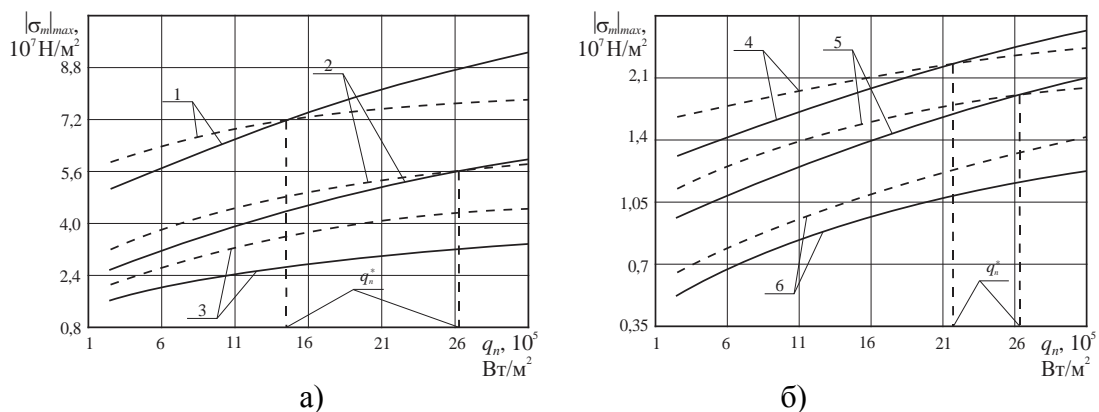


Рис. 4 – Залежність модуля максимальних термічних напружень $|\sigma_m|_{max}$ у прямокутному елементі з оптичного скла К108 та оптичної кераміки КОЗ від зовнішнього теплового потоку для різних часів його дії ($T_0 = 300$ К): 1 – $t = 1,4$ с; 2 – $t = 0,35$ с; 3 – $t = 0,1$ с; 4 – $t = 0,1$ с; 5 – $t = 8,3$ с; 6 – $t = 0,5$ с; q_n^* – критичні значення зовнішнього теплового потоку, Вт/м²; ——— – результати розрахунків; - - - - - межа міцності оптичного матеріалу σ^* [2, 7, 8]; а) – елемент малої товщини з оптичного скла К108; б) – елемент значної товщини з оптичної кераміки КОЗ

Зіставлення результатів розрахунків (див. рис. 5) з експериментальними даними^{*)} показало, що розходження між ними не перевищують 7...9 %.

Розроблені методи визначення критичних значень параметрів зовнішніх термодій на оптичні елементи були використані при розробці методичних рекомендацій “Прогнозування критичних значень небезпечних чинників для попередження руйнувань оптичних елементів точного приладобудування на об’єктах їх виробництва, зберігання, транспортування та застосування” (затверджено державним підприємством ДПНВК “Фотоприлад” (м. Черкаси, 2015)), які доповнюють нормативні документи на проектування, виготовлення та умови обігу серійних приладів (лазерних

тепловізійних прицільних комплексів з оптичними вхідними захисними вікнами, лазерних терапевтичних та хірургічних приладів тощо).

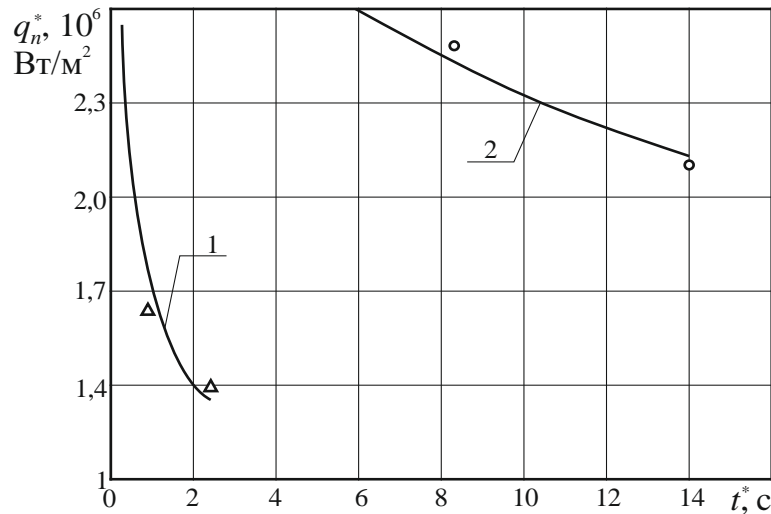


Рис. 5 – Взаємозв’язок критичних значень зовнішнього теплового потоку q_n^* та часу його дії t^* на прямокутний елемент з оптичного скла К108 та оптичної кераміки КОЗ ($T_0 = 300$ К): \circ , Δ – експериментальні дані; 1 – елемент малої товщини з оптичного скла К108; 2 – елемент значної товщини з оптичної кераміки КОЗ

Це дозволяє попереджати можливі відмови при їх експлуатації з урахуванням впливу зовнішніх термодій шляхом визначення критичних значень їх параметрів, а також покращувати основні техніко-експлуатаційні характеристики приладів (надійність, термін служби тощо).

^{*}Для проведення експериментальних досліджень використовувався керований ІЧ-нагрів кварцовими лампами типу КГМ-220-1000-1 з використанням термодатчиків РИФ-101 для контролю температур поверхонь елементів в діапазоні 300...1900 К та теплових потоків, що поступають на них [2, 6].

ВИСНОВКИ

1. Розроблено нелінійні математичні моделі зовнішніх термодій на прямокутні оптичні елементи різної товщини, які враховують температурні залежності теплофізичних властивостей матеріалів (об’ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності) та дозволяють визначати розподіли температури та термопружних напружень у елементах з оптичного скла та керамік з відносно похибкою знижено на 7...9 %.

2. Вперше встановлено наступний вплив параметрів зовнішніх термодій (теплового потоку q_n та часу його дії t) на величину максимальних термопружних напружень у розглядуваних елементах: збільшення q_n від $1,5 \cdot 10^5$ Вт/м 2 до $2,3 \cdot 10^6$ Вт/м 2 та t від 0,2 с до 1,5 с призводить до зростання максимальних термопружних напружень на 1,8...3,8 разів для оптичного скла та у 1,5...3,5 разу – для оптичних керамік.

3. Вперше встановлено критичні діапазони зміни параметрів зовнішніх термодій (q_n^*, t^*), які залежать від природи оптичних матеріалів, перевищення яких призводить до руйнування оптичних елементів та виходу з ладу приладів на їх основі.

Перелік використаних джерел

1. Тепловые процессы при электронной обработке оптических материалов и эксплуатации изделий на их основе : монография / В.А. Ващенко [и др.]. – К.: Наукова думка, 2006. – 368с.
2. Основи електронної обробки виробів з оптичних матеріалів. Монографія / В.А. Ващенко [и др.]. – К.: Наукова думка, 2011. – 562с.
3. Танковые ночные системы и приборы наблюдения / А.Р. Глущенко [и др.]. – Черкассы: Фотоприбор, 2007. – 441с.
4. Лазерные системы танковых прицелов / А.Р. Глущенко [и др.]. – Черкассы: Маклаут, 2009. – 600с.
5. Современные аспекты лазерной терапии / М.Н. Бонусь [и др.]. – Черкассы: Вертикаль, 2011. – 608с.
6. Основи теплоперенесення в елементах оптичного приладобудування. Навчальний посібник. / В.А. Ващенко [и др.]. – К.: НТУУ “КПІ”, 2012. – 412с.
7. Справочник конструктора оптико-механических приборов / В.А. Панов [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1980. – 742с.
8. Окатов М.А. Справочник оптика-технолога / М.А. Окатов, Э.А. Антонов, А.Б. Байгожин. – СПб.: Политехника, 2004. – 679с.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600с.
10. Карташов Э.М. Аналитические методы в теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. – М.: Высшая школа, 1985. – 324с.
11. Коваленко А.Д. Основы термоупругости / А.Д. Коваленко. – К.: Наукова думка, 1970. – 307с.
12. Визак В.М. Управление температурными напряжениями и перемещениями / В.М. Визак. – К.: Наукова думка, 1988. – 312с.

Яценко И. В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ТЕРМОВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТОЧНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Разработаны нелинейные математические модели внешних термовоздействий на оптические прямоугольные элементы, позволяющие находить распределения температуры и термоупругих напряжений по их толщине. Определены критические значения параметров внешних термовоздействий (тепловых потоков, времен их действия), превышение которых приводит к разрушению элементов (появление трещин, сколов и др. дефектов) и выходу из строя приборов на их основе.

Ключевые слова: оптический элемент, внешние термические воздействия, электронный луч.

Yatsenko I.V.

DETERMINATION OF CRITICAL VALUES PARAMETERS OF THERMO OPTICAL ELEMENTS ON A RECTANGULAR PRECISION INSTRUMENTS

Modern devices with optical elements for measurement and thermal control of objects of different physical nature are subject to intensive external thermo-influences (high

temperature and external pressure, shock thermo-influences in the conditions of the shot and flight etc.). In these conditions there is a significant change of properties of surface layers of optical elements up to their fracture, which leads to a significant deterioration of technical-operational characteristics of the devices and their failure. Therefore, significant importance is the prevention of forced destruction of the optical elements in the case of the effects of external thermal influences. It should be based on scientifically-based methods of determining critical parameters of thermal effects on optical elements, the exceeding of which leads to premature failure of the elements. The aim of this work is to develop nonlinear mathematical models of external thermo-influences on optical rectangular elements of varying thickness, taking into account temperature dependence of thermo-physical material properties (volumetric heat capacity and thermal conductivity) and more accurately find the critical values of their parameters. Developed a nonlinear mathematical model of external thermo-influences on rectangular optical elements, allows to find the distribution of temperature and thermo-elastic stresses in their thickness. Defined critical parameters external thermo-influences (heat flux, the time of their actions), the exceeding of which leads to the destruction of the elements (appearance of cracks, chips and other defects) and failure of devices based on them.

Keywords: optical element, external thermal influences, electron beam.

Рецензент: д.т.н., проф. Суглобов В.В.

Стаття надійшла 20.08.2016 р.

УДК 614.841.536.46

Кириченко О.В.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НАГРІВУ БІЧНИХ ПОВЕРХОНЬ МЕТАЛЕВИХ КОРПУСІВ ПІРОТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ В УМОВАХ ПОСТРІЛУ ТА ПОЛЬОТУ

Проведено моделювання та розрахунок ударних теплових впливів надзвукового газового потоку на бічну поверхню металевих корпусів піротехнічних нітратовмісних виробів. Визначено припустимі діапазони зміни параметрів теплових впливів (швидкості газового потоку, режиму обтікання (ламінарний, турбулентний), часу впливу), перевищення яких призводить до руйнування піротехнічних виробів та викиду в навколишнє середовище високотемпературних пожежонебезпечних продуктів горіння.

Ключові слова: піротехнічні вироби, надзвуковий газовий потік, тепловий вплив.

Постановка проблеми. Піротехнічні нітратовмісні вироби (ущільнені суміші з порошків металевих паливних (алюмінію, титану, цирконію, алюмінієво-магнієвих сплавів, магнію тощо), нітратовмісних окиснювачів (нітратів натрію, калію, стронцію, барію тощо) та добавок органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, смоли 214, ідитолу, тіоколу тощо)) широко використовуються у різних областях народного господарства та військової техніки (освітлювальні, сигнальні та трасуючі засоби, піротехнічні ІЧ-випромінювачі, піропатрони ракетно-космічної техніки тощо) [1, 2]. В умовах пострілу та польоту металеві корпуси виробів піддаються ударним тепловим впливам у результаті надзвукового обдування потоком повітря (швидкість потоку до $2 \cdot 10^3$ м/с) (рис. 1).