

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ СТРИЧКОВОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПОТОКУ НА ТЕМПЕРАТУРНІ ПОЛЯ В ЕЛЕМЕНТАХ ВОЛЗ

Яценко І.В., к.т.н., доцент,
Ващенко В.А., д.т.н., професор,
Цибулін В.В.,
Рева І.А.,
Чепурна О.М.

Черкаський державний технологічний університет

Разработана нелинейная математическая модель теплового воздействия ЛЭП на оптические элементы ВОЛС, учитывающая температурные зависимости теплофизических свойств обрабатываемого материала и результаты зондирования электронного потока. Модель позволяет с точностью 8-12 % прогнозировать допустимые диапазоны изменения параметров ЛЭП, не приводящие к резкому ухудшению параметров качества элементов вплоть до их разрушения.

Ключевые слова: нелинейная математическая модель, ленточный электронный поток.

Вступ

В теперішній час однією з важливих проблем, що стоять перед точним приладобудуванням (волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ), інтегрально-оптичні схеми тощо [1 – 11]), є підвищення довговічності та надійності роботи виробів з оптичних матеріалів. Традиційні методи фінішної обробки (механічні, хімічні тощо) матеріалів (стекло, керамік), включаючи й цілий ряд інших високоміцних та труднооброблюваних матеріалів, не дозволяють отримувати гладкі з мінімальною шорсткістю, чисті та бездефектні поверхні, які відповідають всім вимогам субмікронних технологій різного призначення, що інтенсивно розвиваються. Як показала практика, до числа найбільш перспективних методів обробки вказаних матеріалів є їх електронна обробка (ЕЛО) [1, 6, 8, 9, 12 – 14], подальший розвиток та вдосконалення якої нерозривно пов'язані з вмінням керувати параметрами якості поверхневих шарів оптичних виробів, які визначені державними та міжнародними стандартами (шорсткість поверхні, її площинність, залишкові термонапруження, товщина оплавленого шару тощо) в залежності від керованих параметрів ЕЛО. При цьому параметри якості, як показують численні технологічні експерименти, повністю визначаються температурними полями, які реалізуються у оброблюваних оп-

The nonlinear mathematical model of thermal influence of band electronic thread (BETH) on the optical elements FOCL, taking into account the temperature dependences of thermo-physic properties of the processed material and results of sounding of electronic stream, has been developed in the article. The model allows, with the exactness of 8–12 %, to forecast possible ranges of change of band electronic thread parameters, which do not lead to the sharp worsening of parameters of elements quality up to their destruction.

Key words: nonlinear mathematical model, band electronic thread.

тичних матеріалах. Тому метою даної роботи є моделювання та розрахунок температурних полів у оптичних матеріалах при впливі стрічкового електронного потоку (СЕП) в залежності від його керованих параметрів (струму променя I_n , прискорюючої напруги V_y , відстані від оброблюваної поверхні l , швидкості переміщення потоку V та часу його впливу t).

1. Математична модель процесу нагріву оптичного прямокутного елемента

Розглядувані оптичні елементи використовуються в якості елементів вводу (виводу) оптичного випромінювання у ВОЛЗ.

Розглядається нелінійна математична модель теплового впливу СЕП на оптичний елемент з врахуванням припущень, відомих в теорії теплопровідності [15 – 17] (зокрема, враховуються невеликі швидкості руху СЕП, тобто $V \ll 10^3$ м/с, що дозволяє використовувати для розрахунку температурних полів більш просте рівняння теплопровідності параболічного типу замість більш складного рівняння теплопровідності гіперболічного типу) та з врахуванням, на відміну від існуючих моделей, температурної залежності теплофізичних властивостей (коефіцієнт теплопровідності $\lambda(T)$, об'ємна теплоємність $C_V(T)$) оброблюваного матеріалу та результати зондування СЕП [18], які визначають емпіричні залежності густини потоку енергії у оптичний

матеріал (поверхнєве джерело тепла) $q_n(I_L, V_y, l, t)$. При цьому для використовуваних оптичних елементів виконується наступна умова: $\delta < 2B, H$ та $\delta > B$, тобто $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ (двовірне температурне поле $T(x, z, t)$); $\delta = (a_0^2 \cdot \tau)^{1/2}$, де $a_0^2 = \frac{\lambda_0}{C_{V0}}$ – коефіцієнт те-

плопровідності матеріалу, τ – середній час впливу СЕП на оптичний матеріал); при цьому середовище уздовж осі Oz розглядається як напівнескінченне. У цьому випадку густина потоку енергії q_n стає поверхневим джерелом тепла, що рухається в напрямку осі Ox зі швидкістю V (рис. 1):

$$q_n(x) = \begin{cases} \frac{P_0(I_L, V_y)}{B} \cdot \sqrt{\frac{k_0(I_L, l)}{\pi}} \cdot \frac{e^{-k_0(I_L, l) \cdot x^2}}{\text{erf}[b(I_L, l) \cdot \sqrt{k_0(I_L, l)}]}, & |x| < b, \\ 0, & |x| > b. \end{cases} \quad (1)$$

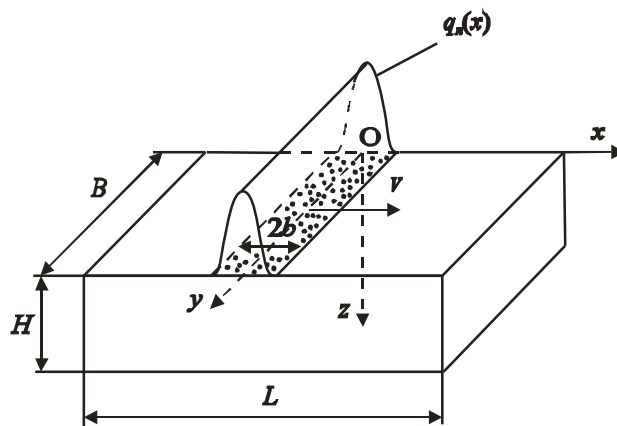


Рис. 1. Схема процесу нагрівання оптичного елемента рухомих СЕП:

$2b$ – товщина СЕП, м; B, H, L – ширина, товщина й довжина бруска, м; V – швидкість руху СЕП, м/с; $q_n(x)$ – поверхнева густина теплового впливу, Вт/м²

Рівняння математичної моделі процесу нагрівання бруска великої товщини (у рухо-

мій системі координат, зв'язаній із джерелом тепла) мають вигляд [17]:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right] + C_V(T) \cdot V \cdot \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2)$$

$t > 0, \quad -\infty < x < +\infty, \quad 0 < z < +\infty,$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (3) \quad \theta \rightarrow 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x}, \frac{\partial \theta}{\partial z} \rightarrow 0 \text{ при } x \rightarrow \pm\infty, \quad z \rightarrow +\infty, \quad (9)$$

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_n(x), \quad (4) \quad \text{де } \theta = T^{\nu+1} - T_0^{\nu+1}, \quad \bar{q}_n(x) = \frac{\nu+1}{\lambda_0} \cdot q_n(x). \quad (10)$$

$$T \rightarrow T_0, \quad \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial z} \rightarrow 0 \text{ при } x \rightarrow \pm\infty, \quad z \rightarrow +\infty. \quad (5)$$

Використовуючи залежності $C_V(T) = C_{V0} \cdot T^\nu, \quad \lambda(T) = \lambda_0 \cdot T^\nu$ [1, 12],

одержуємо

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_0^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + V \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x}, \quad (6)$$

$$\theta|_{t=0} = 0, \quad (7)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = \bar{q}_n(x), \quad (8)$$

Для зведення системи рівнянь (6) – (9) до стандартного (фундаментального) вигляду зробимо заміну змінних:

$$\theta(x, z, t) = \bar{\theta}(x, z, t) \cdot e^{-\frac{V \cdot x}{2a_0^2} - \frac{V^2 \cdot t}{4a_0^2}}. \quad (11)$$

Одержуємо

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = a_0^2 \cdot \left(\frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z^2} \right), \quad (12)$$

$$\bar{\theta}|_{t=0} = 0, \quad (13)$$

$$-\left. \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \right|_{z=0} = \bar{q}_n(x), \quad (14)$$

$$\bar{\theta} \rightarrow 0, \quad \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x}, \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \rightarrow 0 \text{ при } x \rightarrow \pm\infty, z \rightarrow +\infty, \quad (15)$$

$$\bar{q}_n(x) = \bar{q}_n(x) \cdot e^{\frac{V \cdot x}{2a_0^2} + \frac{V^2 \cdot t}{4a_0^2}}. \quad (16)$$

$$T(x, z, t) = \left[T_0^{v+1} + \frac{v+1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_0} \cdot e^{-\frac{V \cdot x}{2a_0^2} - \frac{V^2 \cdot t}{4a_0^2}} \cdot \int_0^t \frac{e^{-\frac{V^2 \cdot \tau}{4a_0^2}}}{t-\tau} d\tau \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} q_n(\xi) \cdot e^{\frac{V \cdot \xi}{2a_0^2} - \frac{(x-\xi)^2 + z^2}{4a_0^2 \cdot (t-\tau)}} d\xi \right]^{\frac{1}{v+1}}. \quad (17)$$

Підставляючи (1) у (17), одержуємо вираз для $T(x, z, t)$, що дозволяє розраховувати

Для розв'язання системи рівнянь (12) – (15) використовуємо методи інтегральних перетворень Фур'є (спочатку по координаті x , а потім по координаті z), а також, з огляду на (10), (11) та (12), одержуємо розв'язок вихідної задачі у вигляді:

вплив параметрів СЕП на температурне поле у оптичному елементі:

$$T(x, z, t) = \left\{ T_0^{v+1} + \frac{(v+1) \cdot P_0(I_L, V_y) \cdot \sqrt{k_0(I_L, l)} \cdot a_0}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_0 \cdot B \cdot \operatorname{erf}\left[b(I_L, l) \cdot \sqrt{k_0(I_L, l)}\right]} \cdot e^{-\frac{V \cdot x}{2a_0^2} - \frac{V^2 \cdot t}{4a_0^2}} \cdot \int_0^t \frac{e^{-\frac{V^2 \cdot \tau}{4a_0^2}}}{\sqrt{(t-\tau) \cdot \left(1 + 4a_0^2 \cdot k_0(I_L, l) \cdot (t-\tau)\right)}} \cdot \frac{4a_0^2 \cdot x^2 \cdot k_0(I_L, l) - V \cdot [2x + V \cdot (t-\tau)]}{4a_0^2 \cdot \left[1 + 4a_0^2 \cdot k_0(I_L, l) \cdot (t-\tau)\right]} \cdot \frac{z^2}{4a_0^2 \cdot (t-\tau)} \cdot \operatorname{erf}\left[\sqrt{\frac{1 + 4a_0^2 \cdot k_0(I_L, l) \cdot (t-\tau)}{4a_0^2 \cdot (t-\tau)}} \cdot \left(b(I_L, l) + \frac{x + V \cdot (t-\tau)}{1 + 4a_0^2 \cdot k_0(I_L, l) \cdot (t-\tau)}\right)\right] + \operatorname{erf}\left[\sqrt{\frac{1 + 4a_0^2 \cdot k_0(I_L, l) \cdot (t-\tau)}{4a_0^2 \cdot (t-\tau)}} \cdot \left(b(I_L, l) - \frac{x + V \cdot (t-\tau)}{1 + 4a_0^2 \cdot k_0(I_L, l) \cdot (t-\tau)}\right)\right] d\tau \right\}^{\frac{1}{v+1}}. \quad (18)$$

2. Розрахунки впливу параметрів СЕП на температурні поля в елементах з оптичних стекел і керамік, вибір допустимих режимів нагрівання, зіставлення з експериментальними даними

При відпрацюванні технологічних режимів поверхневої обробки оптичних стекел і керамік встановлено, що максимальна температура обробки T_m (температура в центрі рухомого СЕП) не повинна перевершувати для оптичних стекел критичної температури T^* (T^* – температура скла в рідкому стані, коли різко збільшується його плинність; наприклад, для скла К-8 – $T^* = 1400$ К), а для оптичної кераміки – T^{**} (T^{**} – температура початку інтенсивної рекристалізації кераміки; наприклад, для кераміки КО-2 – $T^{**} = 1100$ К). Проведені технологічні експерименти показали, що перевищення зазначених температур при поверхневій обробці розглядуваних оптичних матеріалів СЕП призводить до таких небажаних явищ, що погіршують якість оброблених поверхонь:

- у випадку оптичних стекел починається інтенсивне поверхневе випаровування матеріалу й значна деформація розплаву на їхніх поверхнях, що призводить до істотних порушень площинності й геометричної форми;
- у випадку оптичних керамік відбувається інтенсифікація рекристалізації поверхні й

прилягаючих до неї шарів, що призводить до різкого збільшення поглинання випромінювання в ІЧ-області спектра, тобто помітно знижується їхній коефіцієнт ІЧ-пропускання й погіршуються техніко-експлуатаційні характеристики виробів на їхній основі.

Тому при виборі оптимальних режимів обробки оптичних стекел і керамік рухомими СЕП необхідно вміти прогнозувати вплив керованих параметрів СЕП на максимальну температуру обробки T_m з метою визначення й контролю допустимих діапазонів зміни зазначених параметрів СЕП, що не призводять до перевищення зазначених вище температур T^* (для оптичних стекел) та T^{**} (для оптичних керамік), тобто контролю виконання таких умов:

1) для оптичних стекел – $T_m \leq T^*$ при

$$I_{л1}^* \leq I_{л} \leq I_{л2}^*, V_{y1}^* \leq V_y \leq V_{y2}^*, l_1^* \leq l \leq l_2^*, V_1^* \leq V \leq V_2^*, t_1^* \leq t \leq t_2^*;$$

2) для оптичних керамік – $T_m \leq T^{**}$ при

$$I_{л1}^{**} \leq I_{л} \leq I_{л2}^{**}, V_{y1}^{**} \leq V_y \leq V_{y2}^{**}, l_1^{**} \leq l \leq l_2^{**}, V_1^{**} \leq V \leq V_2^{**}, t_1^{**} \leq t \leq t_2^{**}.$$

Для ефективнішого проведення числових експериментів на ПЕОМ, сумісних з ІВМ за нелінійною математичною моделлю були використані спеціально розроблені пакети прикладних програм (ППП) [1, 12], а також із залученням зазначених вище пакетів програм були проведені розрахунки залежностей максимальної температури обробки T_m (температури в зоні впливу рухомого СЕП: $T_m = T(0,0,t)$, див. формулу (18)) від розглядуваних параметрів СЕП (рис. 2 – 5).

З результатів розрахунків, поданих на рис. 2 – 5, випливає, що для часів обробки $t \geq t^*$ ($t^* = 0,2...0,3$ с – для скла К-8; $t^* = 0,4...0,5$ с – для кераміки КО-2) процес нагрівання як оптичного скла, так і оптичної кераміки виходить на квазістаціонарний режим, тобто T_m не змінюється з часом; при цьому величина t^* практично не залежить від параметрів СЕП. За ступенем впливу на величину T_m параметри СЕП розташовуються у вигляді такого ряду: $I_{л}$, V_y , V_y й l . Кількісно ступінь їхнього впливу на T_m оцінюється так: при збільшенні $I_{л}$ від 50 мА до 300 мА величина T_m зростає (для скла К-8 – у 2,3...2,6 разу; для кераміки КО-2 – у 1,4...1,8 разу); зростання V_y від 0,005 м/с до 0,05 м/с призводить до убування T_m (для скла К-8 – у 1,3...1,5 разу; для кераміки КО-2 – у 1,2...1,3 разу); підвищення V_y від 4 кВ до 8 кВ відповідає збільшенню T_m (для скла К-8 – у 1,2...1,4 разу; для

кераміки КО-2 – у 1,1...1,2 разу); збільшення l у межах 60...80 мм приводить до зменшення T_m менш, ніж у 1,1 разу.

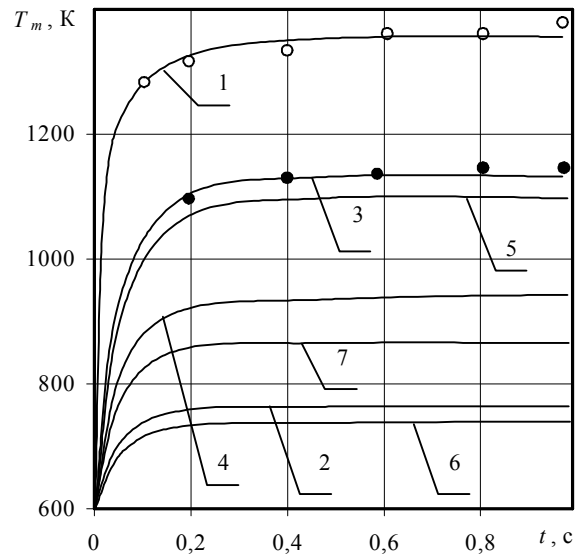


Рис. 2. Залежність максимальної температури T_m від часу електронної обробки елемента з оптичного скла К-8:

1 – $I_n = 300$ мА, $V_n = 4$ кВ, $l = 60$ мм, $V = 0,02$ м/с (○ – експериментальні дані); 2 – $I_n = 50$ мА, $V_n = 4$ кВ, $l = 60$ мм, $V = 0,02$ м/с; 3 – $I_n = 100$ мА, $V_n = 8$ кВ, $l = 60$ мм, $V = 0,02$ м/с; 4 – $I_n = 100$ мА, $V_n = 4$ кВ, $l = 60$ мм, $V = 0,02$ м/с; 5 – $I_n = 100$ мА, $V_n = 4$ кВ, $l = 60$ мм, $V = 0,005$ м/с; 6 – $I_n = 100$ мА, $V_n = 4$ кВ, $l = 60$ мм, $V = 0,05$ м/с; 7 – $I_n = 100$ мА, $V_n = 4$ кВ, $l = 80$ мм, $V = 0,02$ м/с; ● – експериментальні дані (для кривої 5)

Аналіз результатів розрахунків з погляду визначення зазначених вище допустимих діапазонів зміни параметрів СЕП показує, що дійсно такі діапазони існують у процесі електронної обробки як оптичних стекел, так і оптичних керамік:

скло К-8 – для $t = 0,5$ с, $V_y = 8$ кВ, $l = 60$ мм і $V = 0,02$ м/с маємо $I_{л1}^* = 50$ мА $\leq I_{л} \leq I_{л2}^* = 165$ мА; для $t = 0,5$ с, $V_y = 4$ кВ, $l = 60$ мм і $V = 0,02$ м/с маємо $I_{л1}^* = 50$ мА $\leq I_{л} \leq I_{л2}^* = 280$ мА; для $t = 0,5$ с, $I_{л} = 300$ мА, $V_y = 4$ кВ і $l = 60$ мм маємо $V_{y1}^* = 0,005$ м/с $\leq V \leq V_{y2}^* = 0,016$ м/с; для $t = 0,5$ с, $I_{л} = 100$ мА, $V = 0,005$ м/с і $l = 60$ мм маємо $V_{y1}^* = 4$ кВ $\leq V_y \leq V_{y2}^* = 6,3$ кВ;
кераміка КО-2 – для $t = 0,5$ с, $V_y = 8$ кВ, $l = 60$ мм і $V = 0,02$ м/с маємо $I_{л1}^{**} = 50$ мА $\leq I_{л} \leq I_{л2}^{**} = 175$ мА; для $t = 0,5$ с, $I_{л} = 300$ мА, $V_y = 4$ кВ і $l = 60$ мм маємо $V_{y1}^{**} = 0,005$ м/с $\leq V \leq V_{y2}^{**} = 0,01$ м/с.

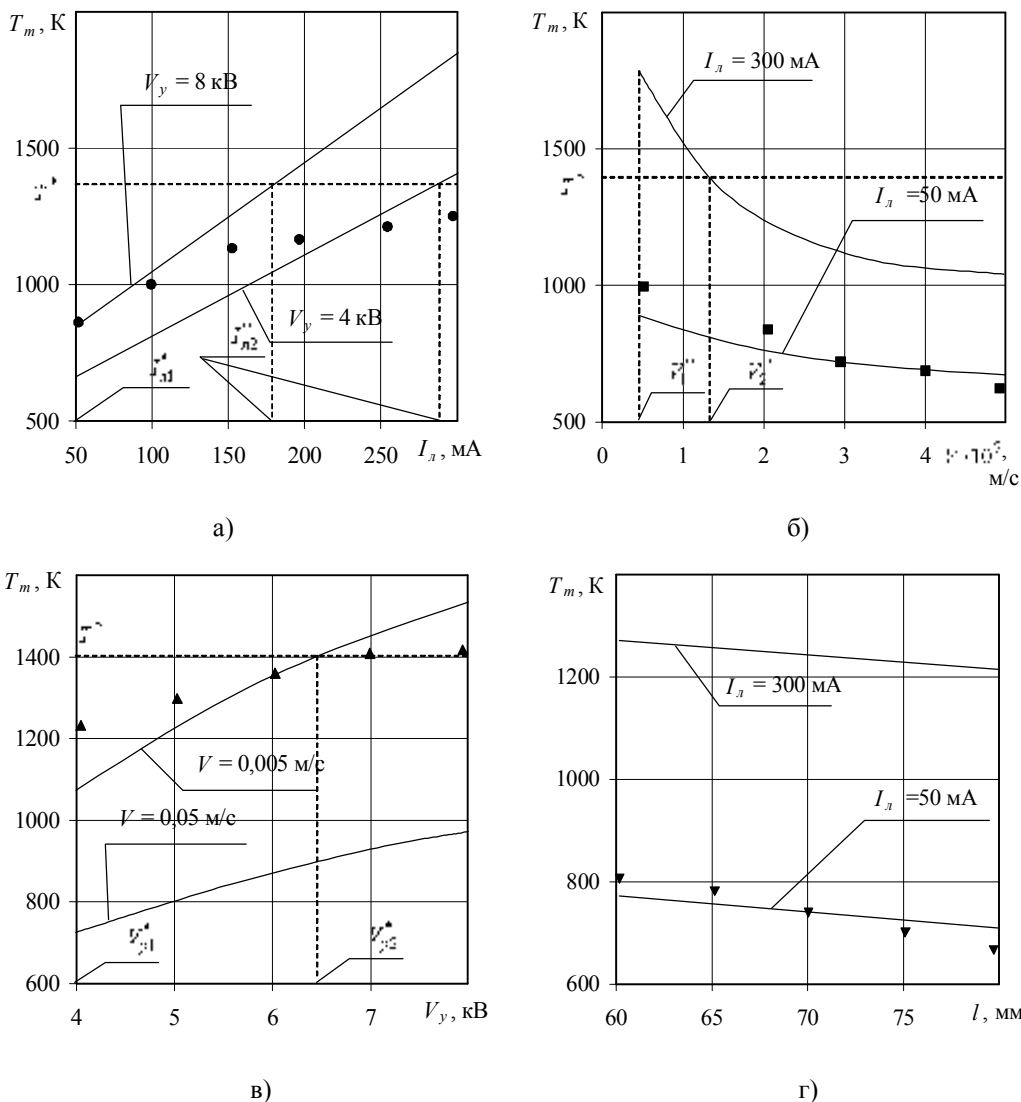


Рис. 3. Вплив параметрів СЕП на максимальну температуру T_m оброблюваного елемента з оптичного скла К-8 : а) – $t = 0,5$ с, $l = 60$ мм, $V = 0,02$ м/с (● – експериментальні дані для $V_y = 4$ кВ); б) – $t = 0,5$ с, $V_n = 4$ кВ, $l = 60$ мм (■ – експериментальні дані для $I_n = 50$ мА); в) – $t = 0,5$ с, $I_n = 100$ мА, $l = 60$ мм (▲ – експериментальні дані для $V = 0,005$ м/с); г) – $t = 0,5$ с, $V_n = 4$ кВ, $V = 0,02$ м/с (▼ – експериментальні дані для $I_n = 50$ мА)

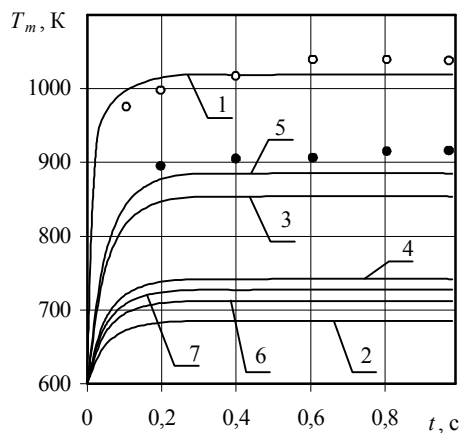


Рис. 4. Залежність максимальної температури T_m від часу електронної обробки елемента з оптичної кераміки КО-2: 1 – $I_n = 300$ мА, $V_y = 4$ кВ, $l = 60$ мм, $V = 0,02$ м/с (○ – експериментальні дані); 2 – $I_n = 50$ мА, $V_y = 4$ кВ, $l = 60$ мм, $V = 0,02$ м/с; 3 – $I_n = 100$ мА, $V_y = 8$ кВ, $l = 60$ мм, $V = 0,02$ м/с; 4 – $I_n = 100$ мА, $V_y = 4$ кВ, $l = 60$ мм, $V = 0,02$ м/с; 5 – $I_n = 100$ мА, $V_y = 4$ кВ, $l = 60$ мм, $V = 0,005$ м/с (● – експериментальні дані); 6 – $I_n = 100$ мА, $V_y = 4$ кВ, $l = 60$ мм, $V = 0,05$ м/с; 7 – $I_n = 100$ мА, $V_y = 4$ кВ, $l = 80$ мм, $V = 0,02$ м/с

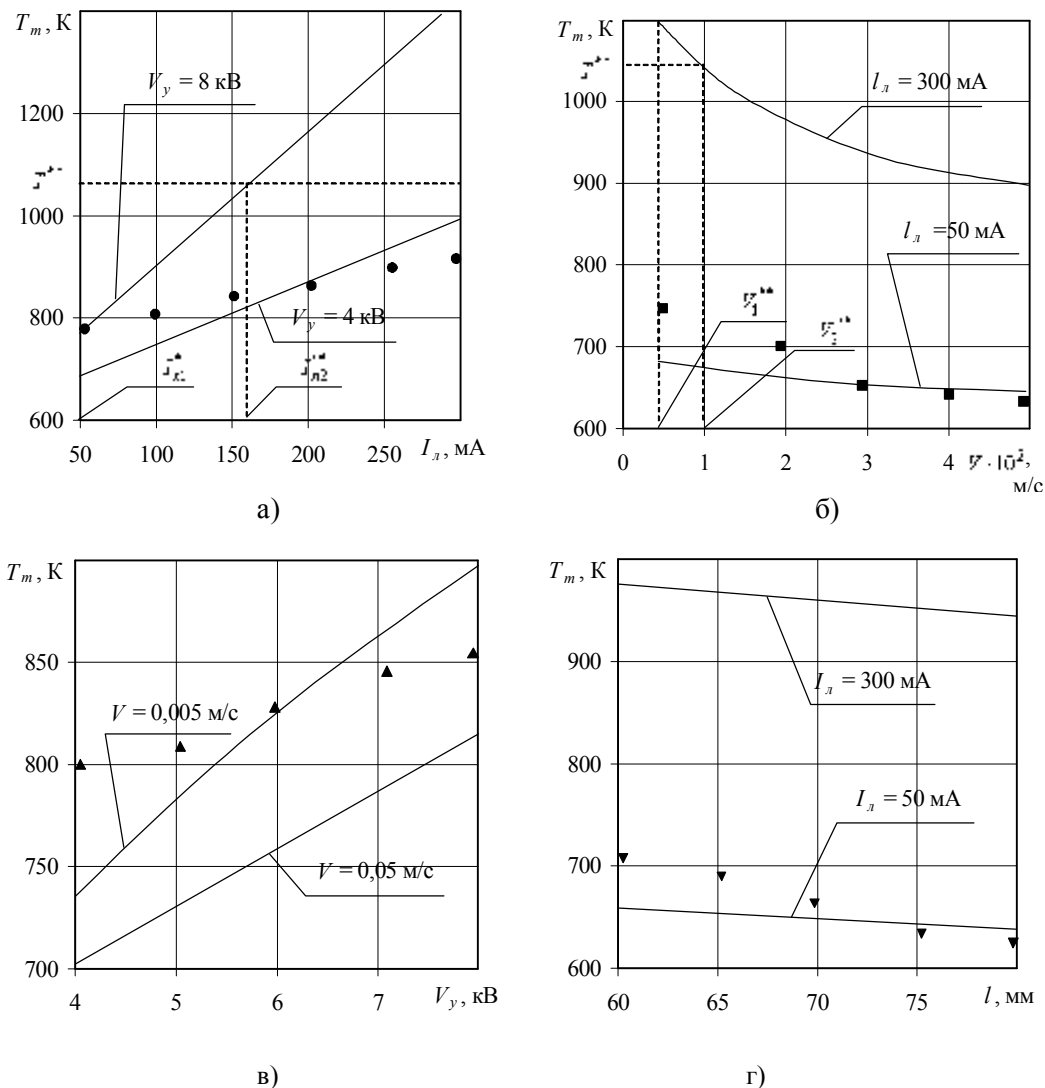


Рис. 5. Вплив параметрів СЕП на максимальну температуру T_m оброблюваного елемента з оптичної кераміки КО-2: а) – $t = 0,5$ с, $l = 60$ мм, $V = 0,02$ м/с (● – експериментальні дані для $V_y = 4$ кВ); б) – $t = 0,5$ с, $V_y = 4$ кВ, $l = 60$ мм (■ – експериментальні дані для $I_l = 50$ мА); в) – $t = 0,5$ с, $I_l = 100$ мА, $l = 60$ мм (▲ – експериментальні дані для $V = 0,005$ м/с); г) – $t = 0,5$ с, $V_y = 4$ кВ, $V = 0,02$ м/с (▼ – експериментальні дані для $I_l = 50$ мА)

Зіставлення окремих результатів розрахунків з експериментальними даними по вимірюванню T_m (дані отримані по методиці безконтактного вимірювання температури поверхні на базі фоторезистора типу ФУО-613 [1, 12, 18]), показало, що вони адекватні один одному (розходження між ними не перевищують 8...12 %).

Висновки

1. Розроблено нелінійну математичну модель теплового впливу СЕП на оптичні прямокутні елементи ВОЛЗ, в якій враховуються температурні залежності теплофізичних властивостей оброблюваного матеріалу та результати зондування СЕП.
2. Зіставлення з результатами експериментів показало, що розроблена модель дозволяє на стадії відпрацювання технологічних ре-

жимів електронної обробки оптичних елементів з точністю 8...12 % вибирати допустимі режими зміни керованих параметрів СЕП, які не допускають різкого погіршення параметрів якості поверхневих шарів оброблюваних оптичних матеріалів, й тим самим підвищувати якість їх обробки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ващенко В. А., Котельников Д. И., Лега Ю. Г., Яценко И. В., Краснов Д. М., Кириченко О. В. Тепловые процессы при электронной обработке оптических материалов и эксплуатации изделий на их основе. – Киев.: Наукова думка, 2006. – 365 с.
2. Яценко И. В. Теплофизические процессы электронной обработки изделий точного приборостроения // Вісник Черкаського дер-

- жавного технологічного університету, 2004. – № 4. – С. 97 – 103.
3. Яценко И. В. Термоупругие напряжения в изделиях ИК-техники при электронной обработке // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2005. – № 1. – С. 93 – 98.
 4. Яценко И. В. Процессы поверхностного оплавления изделий интегральной и волоконной оптики при электронной обработке // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2005. – № 2. – С. 67 – 73.
 5. Яценко И. В., Краснов Д. М., Ващенко В. А., Кириченко О. В. Математическое моделирование термоупругих напряжений при нагреве оптических планарных изделий К-техники сверхзвуковым потоком воздуха // Вісник Черкаського державного технологічного університету, 2003. – № 4. – С. 98 – 105.
 6. Ващенко В. А., Кириченко О. В., Котельников Д. И., Краснов Д. М., Яценко И. В. Расчетная оценка параметров электронной обработки оптической керамики // Электронная обработка материалов. Институт прикладной физики АН Республики Молдова, 2004. – № 5. – С. 87 – 92.
 7. Канашевич Г. В., Рудь М. П., Ващенко В. А., Бойко В. П., Бондаренко М. О., Яценко И. В. Автоматизация перемещений заготовок при формировании функциональных шаров в оптических материалах электронной обработкой // Радиоэлектроника и информатика, 2004. – № 4. – С. 54 – 58.
 8. Ващенко В. А., Кириченко О. В., Котельников Д. И., Краснов Д. М., Яценко И. В. Оптимизация электронной обработки изделий инфракрасной техники // Электронная обработка материалов. Институт прикладной физики АН Республики Молдова, 2004. – № 6. – С. 44 – 48.
 9. Пат. UA 4752 U Україна, МКІ С03В29/00, Н01J37/305. Пристрій для електронно-променевої обробки виробів / Канашевич Г. В., Бондаренко М. О., Рудь М. П., Ващенко В. А., Яценко И. В., (Україна); Заявл. 20.02.2004. Опубл. 15.02.2005. Бюл. № 2.
 10. Дубровская Г. Н., Канашевич Г. В., Ващенко В. А., Котельников Д. И., Яценко И. В. Получение функциональных слоев в оптическом стекле и керамике методом электронной обработки // Сборник докладов Международного научно-практического симпозиума “Функциональные покрытия на стеклах”. – Харьков: НТЦ ХФТИ “Константа”, 2003. – С. 135 – 137.
 11. Яценко И. В., Краснов Д. М., Ващенко В. А., Котельников Д. И. Компьютерные методы моделирования температурных полей и термоупругих напряжений в изделиях ИК-техники, обрабатываемых ленточными электронными потоками // Композиционные материалы в промышленности: Материалы Двадцать четвертой ежегодной международной конференции и выставки, 31 мая – 4 июня 2004 г., Ялта – Киев: УИЦ “Наука. Техника. Технология”, 2004. – С. 326 – 329.
 12. Ващенко В. А. Высокотемпературные технологические процессы взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами. Монография. – Черкассы: Черкасский инженерно-технологический институт, 1996. – 403 с.: ил. 88, – Библиогр. – 343, назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 22.03.96, № 24 – хп 96.
 13. Ващенко В. А., Конопальцева Л. И., Канашевич Г. В. Моделирование процесса обработки оптических материалов электронно-лучевым методом / Стендовый доклад № F / P.146 на IV-й Европейской конференции-выставке по материалам и технологиям Восток – Запад. – С.-Петербург, Россия, 17 – 21 октября 1993 г.
 14. Канашевич Г. В., Ващенко В. А., Конопальцева Л. И., Жученко М. И. Низкоэнергетическая электронно-лучевая обработка поверхности стекла и возможности ее использования в технологии ИО. – Черкассы: Черкасский инженерно-технологический институт, 1993. – 10 с.: ил. – 4, Библиогр. – 10, назв. – Рус. – Деп. в ГНТБ Украины 26.07.93, № 1615 – УК 93.
 15. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
 16. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1966. – 724 с.
 17. Каргашов Э. М. Аналитические методы в теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 1985. – 324 с.
 18. Ващенко В. А., Краснов Д. М., Канашевич Г. В., Яценко И. В., Рудь М. П. Оптимальное управление параметрами электронно-лучевой установки при обработке элементов интегральной оптики // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Материалы Второй Промышленной международной научно-технической конференции, 25 февраля – 1 марта 2002 р., п. Славское, Карпаты – Киев: УИЦ “Наука. Техника. Технология”, 2002. – С. 95 – 96.
- Ващенко В.А.**, д.т.н., професор, завідувач кафедри фізики Черкаського державного технологічного університету.
- Яценко І.В.**, к.т.н., доцент кафедри електротехнічних систем Черкаського державного технологічного університету.
- Цибулін В.В.**, викладач кафедри фізики Черкаського державного технологічного університету.
- Рева І.А.**, аспірант Черкаського державного технологічного університету
- Чепурна О.М.**, студентка Черкаського державного технологічного університету