

Визначення критичних значень параметрів електронного променя при поверхневому оплавленні оптичних елементів точного приладобудування

І.В. Яценко^{1,*}, В.С. Антонюк², В.І. Гордієнко³, В.А. Ващенко¹, О.В. Кириченко⁴

¹ Черкаський державний технологічний університет, вул. Шевченка, 460, 18030 Черкаси, Україна

² Національний технічний університет України «КПІ», просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна

³ Державне підприємство Науково-виробничий комплекс «Фотоприлад», вул. Байди Вишневецького, 85, 18000 Черкаси, Україна

⁴ Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, вул. Онопрієнка, 8, 18034 Черкаси, Україна

(Одержано 18.11.2016, у відредагованій формі – 07.02.2017, опубліковано online 20.02.2017)

Розроблено математичні моделі глибокого оплавлення елементів з оптичного скла при дії електронного променя. Проведено розрахунки товщини оплавленого шару і швидкостей руху поверхні розділу фаз в залежності від параметрів електронного променя (густини та часу його теплового впливу). Встановлено, що при зміні густини теплового впливу променя в діапазоні $7 \cdot 10^6 \dots 8,5 \cdot 10^8$ Вт/м² і збільшенні часу його впливу до 14 с товщина оплавленого шару може досягати 300...500 мкм. Визначено критичні значення параметрів електронного променя, перевищення яких призводить до порушення площинності оптичних елементів, зміни їх геометричної форми і погіршення техніко-експлуатаційних характеристик приладів, аж до їх виходу з ладу.

Ключові слова: Електронний промінь, Оптичний елемент, Товщина оплавленого шару, Точне приладобудування.

DOI: [10.21272/jnep.9\(1\).01010](https://doi.org/10.21272/jnep.9(1).01010)

PACS number: 42.79.Bh

1. ВСТУП

Технології оптичних матеріалів сучасного приладобудування спрямовані на отримання бездефектних хімічно однорідних (ювенільних) поверхонь і характеризуються відмовою від використання абразиву при шліфуванні і поліруванні, а також впровадженням сучасних субмікронних технологій з використанням електронно-променевих технологій [1-3].

Такий розвиток зумовлений, з одного боку, прогресом у створенні мікрооптоелектромеханічних приладів і систем, а з іншого – вдосконаленням матеріалів і мініатюрних деталей для напівпровідникових лазерних випромінювачів, волоконно-оптичних ліній зв'язку, інтегрально-оптичних схем, виробів мікрооптики, які забезпечують високий рівень експлуатаційної надійності цих систем [4-7].

Прецизійні технології розвиваються в напрямку виготовлення і впровадження нового спеціального інструментарію для мікро- і нанотехнологій, який забезпечує виготовлення елементної бази для мікрооптоелектромеханічних приладів, високу екологічну чистоту та енергозбереження виробництва. При цьому особливі перспективи, подальший розвиток і використання мають технології електронно-променевої обробки оптичних елементів точного приладобудування, з допомогою яких шляхом поверхневого оплавлення можна суттєво покращувати їх параметри якості: виключати подряпини, тріщини, відколи та ін. дефекти, що залишаються на поверхні елементів навіть після ретельної механічної обробки [8-13].

Однак проведені експериментальні дослідження показали, що при глибокому оплавленні оптичних елементів (до 300 мкм і вище) відбувається утворен-

ня напливів на їх поверхнях, порушення площинності і втрата геометричної форми елементів, що призводить до погіршення метрологічних характеристик оптичних приладів і виходу їх з ладу. Тому при електронно-променевої обробці оптичних елементів, що поліпшує властивості поверхневих шарів, необхідно знати закономірності процесу глибокого оплавлення елементів в залежності від параметрів електронного променя.

Відомі дослідження по оцінці товщин оплавленого шару на поверхні елементів оптичного скла при їх неглибокому оплавленні (товщина оплавленого шару не перевищує 10...15 мкм) з використанням рівняння координатної лінії початку утворення рідкої фази [1, 4, 5, 7]. Відомості про великі товщини оплавленого шару при глибокому оплавленні розглянутих елементів шляхом руху фронту оплавлення вглиб оптичного матеріалу з врахуванням температурних залежностей їх теплофізичних властивостей, а також дані щодо оцінки їх критичних значень відсутні.

Метою роботи є дослідження технологій електронно-променевої обробки оптичного скла – вивчення закономірностей процесу глибокого оплавлення елементів з оптичного скла і розробка методів пошуку критичних значень параметрів електронного променя (густини та часу його теплового впливу).

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОПТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження впливу параметрів електронного променя на поверхневі шари елементів оптичного скла (К8, К108, К208, БК10, ТФ110) використовувалися пластини товщиною $2 \dots 4 \cdot 10^{-3}$ м, шириною

* irina.yatsenko.79@mail.ru

$2 \dots 4 \cdot 10^{-2}$ м і довжиною $4 \cdot 10^{-2} \dots 8 \cdot 10^{-2}$ м [1, 3, 6, 7]. Для здійснення електронно-променевої обробки оптичних елементів було розроблено спеціалізоване технологічне обладнання, яке захищено патентами України, що дозволяє реалізувати стрічковий електронний промінь шириною $5 \cdot 10^{-4} \dots 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, довжи-

ною $6 \cdot 10^{-2} \dots 8 \cdot 10^{-2}$ м (рис. 1).

Обробка оптичних елементів здійснювалася шляхом сканування електронного променя вздовж поверхні, що забезпечує рівномірний розподіл густини його теплового впливу $F_n = 7 \cdot 10^6 \dots 8,5 \cdot 10^8$ Вт/м².

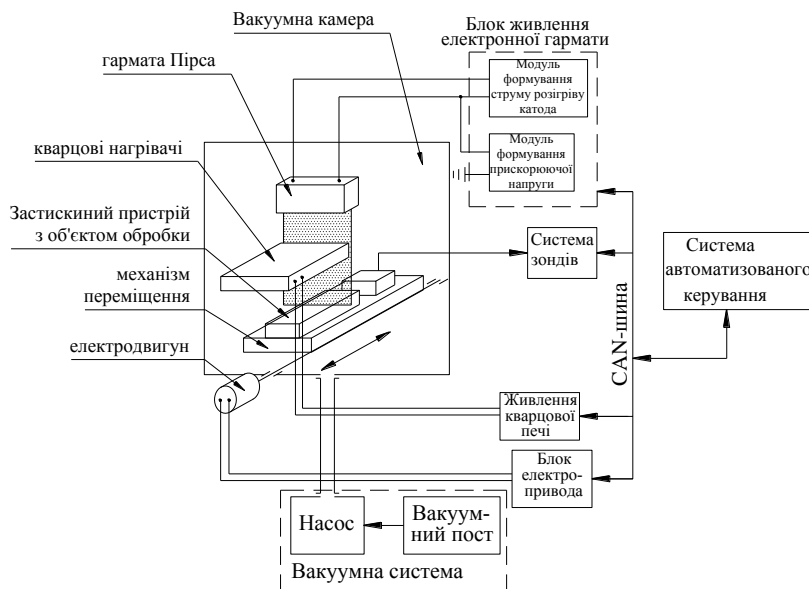


Рис. 1 – Схема електронно-променевої установки

Експериментальні дослідження структури поверхні і товщини оплавлених шарів оптичного скла, утворених електронним променем, проводилися, в основному, за допомогою відомих методів оптичної мікроскопії і мікрозондового аналізу, які включають растрову та скануючу мікроскопію (РЕМ), а також трансмісійну електронну мікроскопію (ТЕМ). Аналіз фрактограм поверхневих шарів оптичного скла до і після електронно-променевої обробки показує, що глибина зони основного термовпливу або максимальна товщина оплавленого шару h_m може досягати до 300...500 мкм; при цьому природа оптичного скла істотно впливає на величину h_m . У проведених дослідженнях з визначення величини h_m відносна похибка не перевищувала 5...10 %.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

Запропонована схема (рис. 2) інтенсивного зовнішнього нагріву і глибокого оплавлення пластини, згідно з якою на її поверхню надходить рівномірно розподілений тепловий потік F_n і встановлюється температура T_n , при якій починається процес поверхневого оплавлення пластини та формується оплавлений шар товщиною $\xi(t)$.

При цьому температура T_n від рівномірно розподіленого теплового потоку F_n визначається з умови [3]: $T^* = (0,9 \dots 0,95) T_n$, де T – температура текучості (рідкого стану) оптичного матеріалу, яка визначається на підставі експериментально встановлених залежностей динамічної в'язкості $\eta(T)$ розплаву оптичного матеріалу.

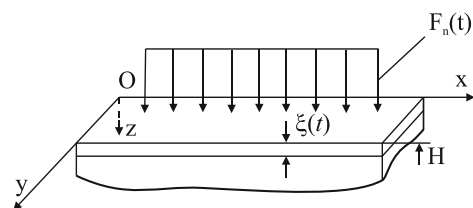


Рис. 2 – Схема зовнішнього нагріву і глибокого оплавлення пластини: $\xi(t)$ – змінна товщина оплавленого шару, м; F_n – густина зовнішнього теплового впливу (тепловий потік), Вт/м²

Передбачається, що $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} \approx 0$ (одномірність поширення тепла в глибину елемента) і $\delta = 2 \cdot (a_0^2 \cdot \tau)^{1/2} \ll H$ (δ – глибина проникнення теплової хвилі в оптичний матеріал, м; $a_0^2 = \frac{\lambda_0}{C_{V0}}$ – коефіцієнт температуропровідності матеріалу, м²/с; τ – час теплового впливу, с), тобто теплові впливи є поверхневими, а теплообмін на нижній стороні елемента не враховується.

Враховуючи, що теплообмін на нижній стороні пластини не впливає на температурне поле в елементі, і, нехтуючи тепловтратами за рахунок конвекції і випромінювання, рівняння математичної моделі даної задачі являє собою нелінійне рівняння теплопровідності з граничними умовами IV роду:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad t > 0, \quad 0 < z < \xi(t) \quad (1)$$

$$T|_{z=0} = T_n, \quad t \geq 0, \quad (2)$$

$$T|_{z=\xi(t)} = T^*, \quad t \geq 0, \quad (3)$$

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\xi(t)} = \lambda_n \cdot \rho \cdot \frac{d\xi}{dt}, \quad t \geq 0, \quad (4)$$

де $\xi(t)$ – змінна товщина оплавленого шару ($\xi(0)=0$); λ_n – прихована теплота фазового переходу, Дж/кг; ρ – густина розплаву оптичного матеріалу, кг/м³.

Враховуючи експериментальні залежності [14]

$$C_V(T) = C_{V0} \cdot T^\nu, \quad \lambda(T) = \lambda_0 \cdot T^\nu, \quad (5)$$

де C_{V0} , λ_0 , ν – емпіричні постійні, а також роблячи заміну змінних

$$\theta(z, t) = T^{\nu+1} - T_0^{\nu+1}, \quad (6)$$

рівняння (1) – (4) перетворюються до вигляду:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_0^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \quad t > 0, \quad 0 < z < \xi(t), \quad (7)$$

$$\theta|_{z=0} = \varphi, \quad t \geq 0, \quad (8)$$

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

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=\xi(t)} = A \cdot \frac{d\xi}{dt}, \quad t \geq 0, \quad (10)$$

$$\text{де } \theta = T^{\nu+1} - T^{*\nu+1}, \quad A = -\frac{\lambda_n \cdot \rho \cdot (\nu+1)}{\lambda_0}, \quad a_0^2 = \frac{\lambda_0}{C_{V0}},$$

$$\varphi = T_n^{\nu+1} - T^{*\nu+1} \quad (11)$$

Застосовуючи для лінеаризованої системи рівнянь (7) – (10) відомі методи інтегральних перетворень у областях з рухомими межами та методи теорії диференціальних рядів, для функції $\theta(z, t)$ отримано наступне загальне співвідношення:

$$\theta(z, t) = -A \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{a_0^{2n} \cdot (2n+1)!} \times$$

$$\times \frac{d^n}{dt^n} \left\{ [\xi(t) - z]^{2n+1} \cdot \frac{d\xi}{dt} \right\} \quad (12)$$

Використовуючи для $\theta(z, t)$ граничну умову (10), отримаємо:

$$-\frac{\varphi}{A} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{b_0^{2n} \cdot (2n+1)!} \cdot \frac{d^n}{dt^n} \left[\xi^{2n+1}(t) \cdot \frac{d\xi}{dt} \right] = \text{const} \quad (13)$$

Співвідношення (13) виконується, якщо

$$\begin{cases} \xi^{2n+1}(t) \cdot \frac{d\xi}{dt} = \gamma_n \cdot t^n, \\ \xi(0) = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Інтегруючи (14), знаходимо наступні закони руху фронту плавлення

$$\xi(t) = \beta \cdot \sqrt{t}, \quad \frac{d\xi}{dt} = \frac{\beta}{2 \cdot \sqrt{t}}, \quad (15)$$

де β – невідомий коефіцієнт, що підлягає визначенню.

Для цього підставимо (15) у (13) і проводячи підсумовування, отримаємо наступне трансцендентне рівняння для знаходження β :

$$-\frac{\varphi}{A \cdot a_0 \cdot \sqrt{\pi}} = \beta \cdot e^{\frac{\beta^2}{4a_0^2}} \cdot \text{erf}\left(\frac{\beta}{2a_0}\right) \quad (16)$$

Виконавши перетворення та інтегрування, внаслідок швидкої збіжності ряду, обмежившись його першими п'ятьма членами (відносна похибка не перевищує 5...7 %) і вважаючи $T^* = 0,925 \cdot T_n$, отримаємо наступний вираз для профілю температури по глибині розплаву, що утворюється на поверхні оптичного елемента при зовнішньому тепловому впливі:

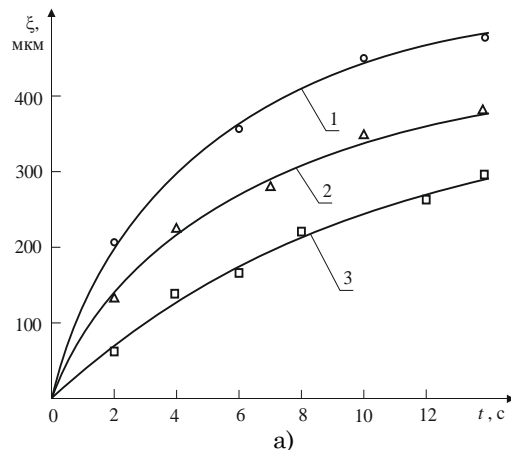
$$T(z, t) = \left\{ \left(1,081 \cdot T^* \right)^{\nu+1} - \frac{2a_0^2 \cdot \beta \cdot \lambda_n \cdot \rho \cdot (\nu+1)}{\pi \cdot \lambda_0} \times \right.$$

$$\times \sum_{n=1}^5 \left[\frac{1}{n} \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{\beta} \right)^2} \cdot \frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{\beta} \cdot \int_0^{\beta \cdot \sqrt{t}} e^{a_0^2 \cdot u^2} \cdot \sin(\beta \cdot u) du + \right.$$

$$\left. + \frac{2 \cdot T^{*\nu+1} (1,081^{\nu+1} - 1)}{\pi \cdot n} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{\pi \cdot n \cdot a_0}{\beta} \right)^2} \right) \right] \times$$

$$\left. \times \sin\left(\frac{\pi \cdot n \cdot z}{\beta \cdot \sqrt{t}} \right) \right\}^{1/\nu+1}, \quad 0 < z < \beta \cdot \sqrt{t} \quad (17)$$

За отриманими формулами (15)-(17) з використанням розроблених пакетів прикладних програм [8], а також необхідних фізичних констант для оптичного скла [14] були проведені розрахунки товщини оплавленого шару і швидкостей руху поверхні розділу фаз (рис. 3, 4). В результаті проведених розрахунків було встановлено, що оплавлений шар на поверхні оптичного елемента формується протягом кількох секунд і далі істотно збільшується із зростанням часу зовнішнього термовпливу. Наприклад, при збільшенні t від 2 с до 14 с значення ξ зростають у 2...3 рази.



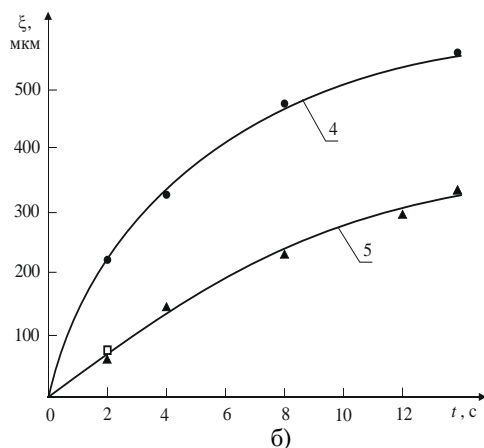


Рис. 3 – Залежність товщини оплавленого шару від часу зовнішнього впливу на елементи з різного оптичного скла: а) – оптичне скло марок К8 (1), К208 (2) і ТФ110 (3); б) – оптичне скло марок К108 (4) і БК10 (5); \circ , \bullet , Δ , \blacktriangle , \square – експериментальні точки

Зіставлення результатів розрахунків залежностей $\xi(t)$ з проведеними експериментальними дослідженнями показало, що між ними є повна відповідність (відносна похибка 5...7 %). При цьому швидкість оплавлення поверхні елемента зі збільшенням часу впливу спочатку різко зменшується (при збільшенні t від 2 до 8 с значення $V_{пл}$ зменшуються у 3...4 рази), а далі цей процес істотно сповільнюється (при збільшенні t від 8 до 14 с значення $V_{пл}$ зменшуються вже у 1,5...2 рази).

Таким чином, при зовнішньому термічному впливі електронного променя на оптичні елементи (нестационарний режим) на його поверхні за короткий час ($t = 2...14$ с) утворюється розплавлений шар великої товщини (до 300...500 мкм). При цьому критичними є наступні діапазони зміни часів зовнішнього теплового впливу: $t > 2...6$ с при зовнішніх теплових потоках $F_n = 7 \cdot 10^6...8,5 \cdot 10^8$ Вт/м², оскільки в цьому випадку на поверхні оптичного елемента утворюється розплавлений шар товщиною, яка перевищує її граничні значення (100...200 мкм) [2, 4]. Перевищення цих значень, як показують проведені експериментальні дослідження, призводить до порушення площинності поверхні елементів, утворення напливів тощо і, в кінцевому результаті, до порушення їх геометричної форми і виходу з

ладу оптичних приладів.

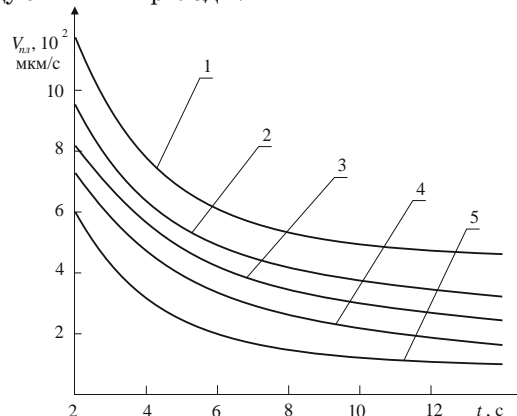


Рис. 4 – Залежність швидкості оплавлення поверхні елементів оптичного скла К108 (1), БК10 (2), К8 (3), К208 (4) і ТФ110 (5) від часу теплового впливу

4. ВИСНОВКИ

1. Уточнено математичну модель глибокого оплавлення елементів з оптичного скла при впливі електронного променя шляхом врахування температурних залежностей їх теплофізичних властивостей та переміщення фронту плавлення углиб елементів.
2. Вперше встановлено існування критичних значень основних параметрів електронного променя (густини та часу теплового впливу) на поверхню оптичних елементів, перевищення яких приводить до глибокого оплавлення елементів, порушення площинності і геометричної форми, наслідком чого є вихід з ладу оптичних приладів на їх основі.
3. Встановлені закономірності показали:
 - при зміні густини теплового впливу електронного променя в діапазоні $7 \cdot 10^6...8,5 \cdot 10^8$ Вт/м² час утворення розплаву на поверхні оптичних елементів становить 1...3 с;
 - при збільшенні часу теплового впливу електронного променя від 2 до 14 с товщина оплавленого шару зростає в 2...3 рази і може досягати 300...500 мкм; при цьому швидкість оплавлення поверхні елемента спочатку різко зменшується (у 3...4 рази при $t = 2...8$ с), а потім її зменшення сповільнюється (в 1,5...2 рази при $t = 8...14$ с).

Определение критических значений параметров электронного луча при поверхностном оплавлении оптических элементов точного приборостроения

И.В. Яценко¹, В.С. Антонюк², В.И. Гордиенко³, В.А. Ващенко¹, О.В. Кириченко⁴

¹ Черкасский государственный технологический университет, бул. Шевченко, 460, 18030 Черкассы, Украина

² Национальный технический университет Украины «КПИ», просп. Победы, 37, 03056 Киев, Украина

³ Государственное предприятие Научно-производственный комплекс "Фотоприбор", ул. Байды Вишневецкого, 85, 18000 Черкассы, Украина

⁴ Черкасский институт пожарной безопасности им. Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины, ул. Оноприенко, 8, 18034, Черкассы, Украина

Разработаны математические модели глубокого оплавления элементов из оптических стекол при

воздействию электронного луча. Проведены расчеты толщины оплавленного слоя и скоростей движения поверхности раздела фаз в зависимости от параметров электронного луча (плотности и времени его теплового воздействия). Установлено, что при изменении плотности теплового воздействия луча в диапазоне $7 \cdot 10^6 \dots 8,5 \cdot 10^8$ Вт/м² и увеличении времени его воздействия до 14 с толщина оплавленного слоя может достигать 300...500 мкм. Определены критические значения параметров электронного луча, превышение которых приводит к нарушению плоскостности оптических элементов, изменению их геометрической формы и ухудшению технико-эксплуатационных характеристик приборов вплоть до их выхода из строя.

Ключевые слова: Электронный луч, Оптический элемент, Толщина оплавленного слоя, Точное приборостроение.

Determining the Critical Parameters of the Electron Beam with Surface Melting of the Optical Elements of Precision Instrumentation

I.V. Yatsenko¹, V.S. Antonyuk², V.I. Gordienko³, V.A. Vashchenko¹, O.V. Kiritchenko⁴

¹ Cherkasy State Technological University, 460, Shevchenko blvd., 18030 Cherkasy, Ukraine

² National technical University of Ukraine «KPI», 37, Pobedy ave., 03056 Kiev, Ukraine

³ State Enterprise Scientific Production Complex "Photopribor", 85, Vishnevetzky Baida str., 18000, Cherkasy, Ukraine

⁴ Cherkasy Institute of Fire Safety named Heroes of Chernobyl National University of Civil Protection of Ukraine, 8, Onoprienko str., 18034 Cherkasy, Ukraine

Mathematical model of deep melting elements made of optical glasses under the influence of the electron beam. The calculations of the thickness of the melted layer and the velocities of the interface depending on the parameters of electron beam (density and time of thermal influence). It is established that when the thermal change in the density of influence of the beam in the range of $7 \cdot 10^6 \dots 8,5 \cdot 10^8$ W/m² and increasing duration of exposure up to 14 s with the thickness of the melted layer can reach 300...500 μm. We calculated critical parameters of the electron beam, the exceeding of which leads to disruption of the flatness of the optical elements, changing their geometrical shape and deterioration of technical and operational characteristics of the devices until they exit their building.

Keywords: The electron beam, Optical element, Thickness of melted layer, Precision engineering.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. I.V. Яценко, *Труди Одеського політехнічного університету* **2**, 143 (2009) (I.V. Yatsenko, *Trudy Odesskoho polytehnicheskoho universytetu* **2**, 143 (2009)).
2. I. Yatsenko, V. Antoniuk, M. Bondarenko, V. Vashchenko, *International journal for science and innovations for the industry* **1**, 13 (2015).
3. В.С. Антонюк, I.V. Яценко, О.В. Кириченко, В.А. Ващенко, *Сучасні технології в машинобудуванні* **11**, 74 (2016) (V.S. Antonyuk, I.V. Yatsenko, O.V. Kyrychenko, V.A. Vashchenko, *Suchasni tekhnolohiyi v mashynobuduvanni* **11**, 74 (2016)).
4. I.V. Яценко, В.С. Антонюк, О.В. Кириченко, В.А. Ващенко, *Вісник Національного технічного університету України* **51**, 71 (2016) (I.V. Yatsenko, V.S. Antonyuk, O.V. Kyrychenko, V.A. Vashchenko, *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu Ukrainy* **51**, 71 (2016)).
5. I.V. Яценко, *Вісник Приазовського державного технічного університету* **17**, 160 (2016) (I.V. Yatsenko, *Visnyk Pryazov'skoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu* **17**, 160 (2016)).
6. I.V. Яценко, В.С. Антонюк, В.А. Ващенко, В.В. Цыбулин, *Наноинженерия* **12**, 26 (2015) (I.V. Yatsenko, V.S. Antonyuk, V.A. Vashchenko, V.V. Tsybulin, *Nanoinzheneriya* **12**, 26 (2015)).
7. I.V. Yatsenko, V.S. Antonyuk, V.A. Vashchenko, V.V. Tsybulin, *J. Nano- Electron. Phys.* **8** No 1, 01027 (2016).
8. I.V. Yatsenko, *Pratsi Odes'kyi politechnichnyi universytet* **1**, 63 (2016).
9. I.V. Yatsenko, *Pratsi Odes'kyi politechnichnyi universytet* **2**, 88 (2016).
10. I.V. Яценко, В.С. Антонюк, В.А. Ващенко, В.В. Цыбулин, *Наноинженерия* **12**, 20 (2015) (I.V. Yatsenko, V.S. Antonyuk, V.A. Vashchenko, V.V. Tsybulin, *Nanoinzheneriya* **12**, 20 (2015)).
11. I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kiritchenko, V. Vashchenko, V. Tsybulin, *Innovations in discrete productions* **1**, 9 (2016).
12. I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kiritchenko, V. Vashchenko, V. Tsybulin, *Innovations in discrete productions* **2**, 11 (2016).
13. I. Yatsenko, V. Antoniuk, O. Kiritchenko, V. Vashchenko, *International journal for science and innovations for the industry "Machines. Technologies. Materials"* **6**, 47 (2016).
14. М.А. Окатов, Э.А. Антонов, А.Б. Байгожин, *Справочник оптика-технолога* (СПб.: Политехника: 2004) (M.A. Okatov, E.A. Antonov, A.B. Baygozhin, *Spravochnik optika-tehnologa* (SPb.: Politehnika: 2004)).