

УДК 621.923



О. В. Тігаренко



Н. В. Зубкова



С. О. Новак

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ПОЛІРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДОЗИМЕТРІВ

Подовжити довговічність функціонування – головна вимога до виробників сучасних приладів радіаційної розвідки та контролю. Запропоновані рішення щодо вдосконалення конструкції виробів передбачають використання оптичних світловодів та відповідне формування канавок петлеподібного профілю у готовому чутливому полімерному елементі. Розглянуто потенційні можливості використання магнітно-абразивного полірування для фінішної обробки поверхонь канавки чутливих елементів дозиметрів з метою підвищення їх надійності та безпечності. Для вибраної конструкції полірувальної головки запропоновано матеріал та форму порошкової композиції і параметри процесу. Досліджено вплив частоти та амплітуди коливання часточок на глибину їх проникнення у поверхневий шар полімеру.

К л ю ч о в і с л о в а: магнітно-абразивне полірування, органічні пластичні сцинтилятори, полістирол, оптичні світловоди, канавка, часточки порошку, амплітуда коливань, частота коливань, шорсткість поверхні.

Постановка проблеми. У вересні 2020 року представники підрозділів радіаційного, хімічного та біологічного захисту військових частин Національної гвардії України підвищували рівень професійної майстерності на навчальному полігоні військової частини 3002 [1]. Особливо важливими під час тренувань були завдання з протидії радіаційній загрозі, що може виникнути не лише під час бойових дій та терористичних актів, а й внаслідок техногенних катастроф. Переважну більшість приладів радіаційної розвідки НГУ складають дозиметри, радіометри і рентгенметри вітчизняного виробництва: ДП-5В (А, Б), ДП-64, ДП-22В. Виявлення радіоактивних речовин та іонізуючих випромінювань (α -, β -, γ -променів) в таких приладах ґрунтується на здатності випромінювань іонізувати речовину середовища, в якій вони поширюються. Внаслідок іонізації відбуваються хімічні і фізичні зміни в речовині-детекторі, які можна виявити і виміряти. Візуальне визначення наявності радіації за спалахуваннями світла (сцинтиляцією) є одним з найбільш простих способів контролю.

Чутливими до випромінювань матеріалами у дозиметрах є органічні пластичні сцинтилятори (ОПС), що складаються з основи (полістиролу), люмінесцентних добавок – активаторів та спектрозміщуючих добавок. Якість ОПС визначається їх здатністю забезпечити сталий високий світловий вихід за малий проміжок часу протягом всього строку експлуатації. Зазначені характеристики формуються шляхом поетапного доведення шорсткості поверхонь ОПС до стану, коли параметр середнього арифметичного відхилення профілю R_a не перевищує 0,1 мкм. Проте вже через 10 років постійної експлуатації внаслідок впливу температури, вологості та радіації ОПС втрачають до 20 % від первинного світловиходу та до 50 % механічної стійкості [2]. Саме тому термін надійної експлуатації вітчизняних дозиметрів обмежений 6-8 роками.

Досвід використання ОПС на основі полістиролу як детекторів заряджених часточок у протон-протонному колайдері ЛНС у м. Церн підтвердив можливість збільшення терміну використання ОПС за рахунок проникнення спектрозміщуючих оптичних волокон, які вкладають у канавки готового виробу для передачі сигналів фотодетекторам. Така волокниста система має великий потенціал впровадження у конструкцію портативних дозиметрів, оскільки є компактною і дозволяє зібрати більше світла та передати сигнали на потужні багатопіксельні вакуумні фотоелектронні пристрої (ФЕП). Єдиною проблемою виготовлення зменшеного варіанту ОПС залишається обробка

мініатюрних і складних за формою канавок до якості поверхонь, співвідносною з якістю зовнішніх поверхонь. Саме тому в останні роки актуальним є питання удосконалення технології високоточної обробки важкодоступних для дрібнорозмірного та абразивного інструменту поверхонь полімерних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Чистовий та фінішний етапи обробки ОПС спрямовані на видалення мікрогребнів (мікроставупів), що залишилися від попередніх технологічних операцій. Оскільки точність, яку при цьому необхідно досягати, становить десяті долі мікрометра, відповідні технологічні процеси відносять до прецизійних.

Механічне зняття мікроставупів можна здійснити за допомогою однієї ріжучої кромки алмазного лезового інструмента або зв'язаних, незв'язаних та вільних абразивів [3]. Враховуючи, що полімерні матеріали піддаються старінню під дією температури, рідин, атмосферного кисню, найбільш придатними прецизійними процесами для їх обробки є механічні процеси, які легко регулювати. Для забезпечення мінімального впливу на поверхневий шар полімерних матеріалів необхідні невеликі зусилля та ріжучі матеріали з твердістю у 2 – 2,5 рази вищі за полімер [4].

До методів, що найбільш широко використовують у виробництві плоских та складних за формою поверхонь, відносять, перш за все, методи полірування. Принципово вони реалізуються за двома механізмами: механічним та хімічним [5]. Перший заснований на ефектах тертя та ерозії, що обумовлюють пластичне деформування матеріалу поверхневого шару та його руйнування. Другий (хімічний) провокує розплавлення матеріалу під дією хімічних реакцій. Який з цих механізмів є основним (домінуючим) у спільному технологічному процесі полірування, – залежить від властивостей абразивних матеріалів та полімеру.

На заводі використанню механічної обробки зв'язаними абразивами (шліфування) стає висока температура в зоні контакту та проблема контролю рівномірного прикладання зусиль різання, через що на поверхні полімерних матеріалів залишаються сліди від абразивів, а деякі їх часточки можуть навіть проникати у поверхневий шар.

Серед найбільш перспективних методів механічної обробки з гнучким регулюванням впливу та малою температурою (від 60 °С до 150 °С) виділяють полірування у магнітному полі. Використовуючи рідини або повітря у суміші з абразивними порошками різного складу, форми та розмірів, підбирають необхідну для зрізання в'язкість середовища [6]. Під дією магнітного поля феромагнітні абразивні часточки намагнічуються та вишукуються у ланцюжки (рис. 1).

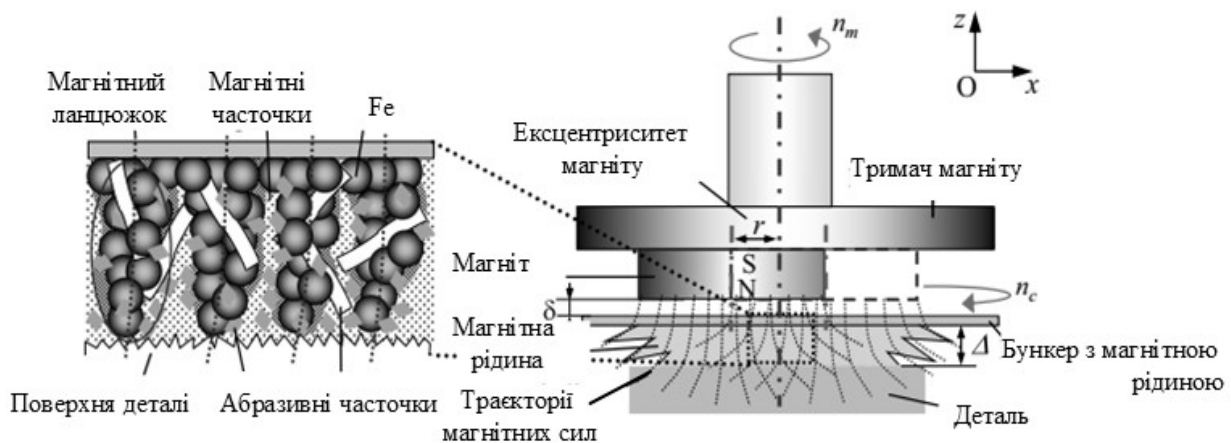


Рис. 1. Схема магнітно-абразивного полірування у рідкому середовищі [4]

Вони утворюють просторову структуру, що і змінює механічні властивості середовища – збільшує границю текучості. Енергія потоку рідини передається абразивним часточкам для здійснення ерозії поверхні та зрізання матеріалу. Залежно від параметрів процесу режим зрізання матеріалу може змінюватися від інтенсивного різання до м'якого полірування. За відсутності магнітного поля часточки повертаються у дезорганізований або вільний стан і вихідні властивості матеріалу, відповідно, відновлюються. Висока продуктивність процесу полірування досягається за умови великих швидкостей та коротких циклів полірування. Відомо, що при магнітно-абразивному

поліруванні металевих матеріалів [7] інтенсивність знімання припуску приблизно у 50 разів вища, ніж у процесі доводки, через великі швидкості полірування – до 10 000 об/хв. Відповідні дані для полімерних матеріалів відсутні.

У статті [4] наведені результати полірування органічного скла у суміші магнітної та магнітореологічної рідин з часточками карбонільного заліза (середній діаметр 2 мкм). Зазначено, що найкраща якість поверхні отримується при концентрації абразивних часточок не менше 70 %. Подальші можливості удосконалення процесу пов'язані з використанням обертового магнітного поля, регулюванням швидкості подачі порошку, розмірами його часточок та властивостями середовища, в якому діє магнітне поле. Невизначеним залишається питання впливу рідини на структуру поверхневого шару полімеру та зміну його оптичних характеристик з часом.

Магнітно-абразивне полірування полімерних матеріалів має свої особливості. У випадку виготовлення відповідальних сцинтиляційних виробів оновленої конструкції з канавками під світловоди на першому етапі виробництва варто теоретично визначити діапазон можливих значень параметрів процесу з урахуванням властивостей полімеру та специфіки полірувального пристрою.

Метою статті є оприлюднення результатів наукових досліджень з визначення параметрів магнітно-абразивного полірування для фінішної обробки канавок під світлооптичні волокна в чутливих до радіаційних випромінювань полімерних матеріалах.

Для досягнення поставленої мети досліджень необхідно було вирішити дві задачі:

1) розробити математичний опис процесу проникнення абразивної частинки у поверхню полімеру під дією магнітного поля для кількісного оцінювання рівня шорсткості, що формується при поліруванні;

2) визначити параметри режиму магнітно-абразивного полірування, що найбільше впливають на шорсткість поверхні полімеру.

Виклад основного матеріалу. Згідно з встановленими нормативами на матеріали для радіаційного контролю та внутрішніми вимогами науково-виробничого підприємства “Інститут сцинтиляційних матеріалів Національної академії наук України” [8] для досліджень вибрано найбільш стійкі до радіації сцинтилятори на основі полістиролу (ПС) марки UPS-923A.

Сцинтиляційний виріб (рис. 2) являє собою пластину товщиною 60 мм з канавкою під світловод циліндричної форми, який передає фотони до пристрою зчитування – фотоелектронного помножувача (ФЕП).

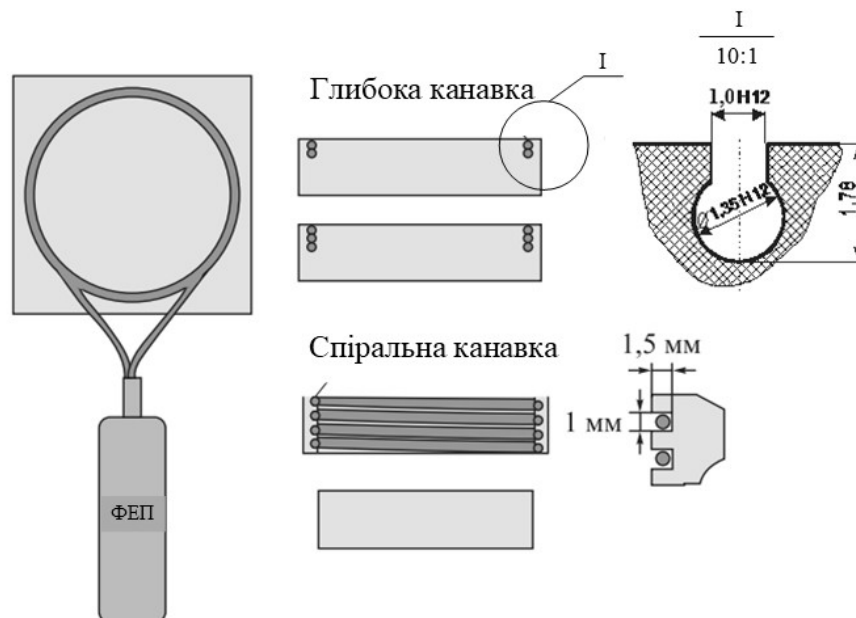


Рис. 2. Полімерний сцинтилятор з канавками під світловод

Зовнішні контури виробу попередньо оброблені до рівня шорсткості R_a від 0,1 мкм до 0,3 мкм. Канавка зі складним петлеподібним профілем формується фрезеруванням дрібнорозмірними фрезами

зі швидкорізальної сталі Р6М5: кінцевою $\varnothing 0,86$ мм та сферичною $\varnothing 1,35$ мм. Отриманий рівень шорсткості внутрішніх поверхонь канавки знаходиться в межах R_a від 0,6 мкм до 1 мкм.

Фінішну обробку внутрішніх поверхонь канавки пропонується здійснювати за допомогою полірувальної головки, в якій реалізується принцип магнітно-абразивного полірування (рис. 3, а). Замість рідини у робочій зоні полірування пропонується використовувати стиснуте повітря, оскільки ПС піддається вологопоглинанню. Головка кріпиться на шпинделі свердлильно-фрезерного розточного верстата і складається з двох напрямних штирьків 1, які встановлюються в канавку, площини з немагнітної нержавіючої сталі 2, що ковзає (рис. 3, б), двох електромагнітів 3, датчиків контролю переміщення 7 та 8, ємності для абразивного порошку 4, трубки подачі порошку 5 та трубки висмоктування порошку 6 (рис. 3, а).

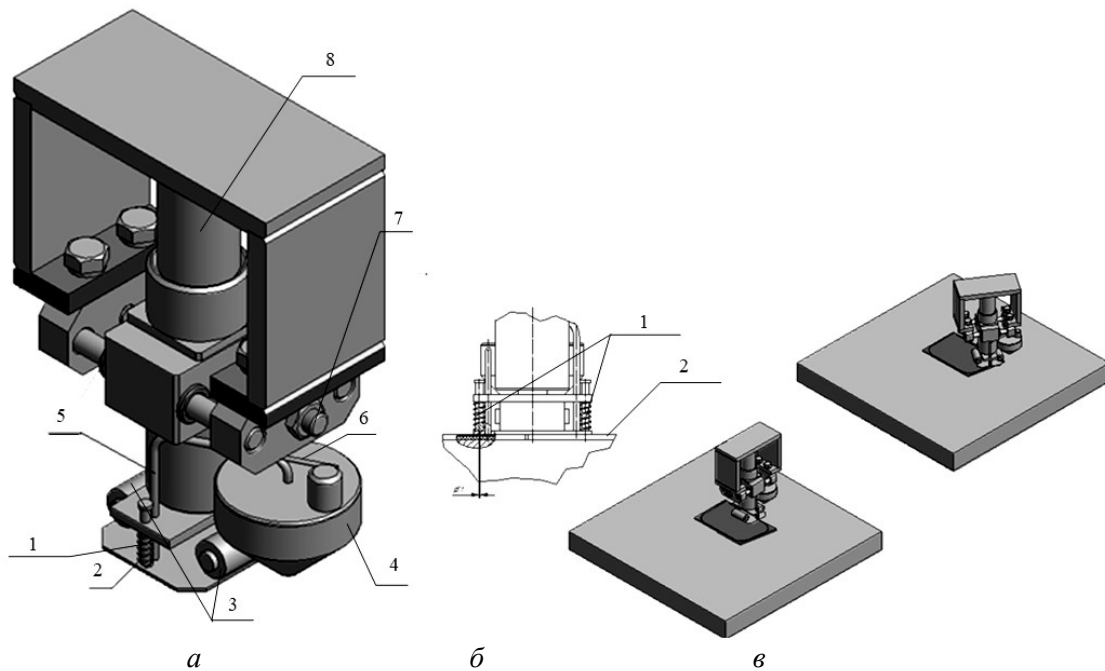


Рис. 3. Головка для магнітно-абразивного полірування: а, б – конструкція; в – положення головки у процесі обробки

Технологічний процес полірування відбувається таким чином. Напрямні штирьки 1 заходять у попередньо профрезеровану канавку з протилежних боків та виконують роль щупів, що відстежують траєкторію переміщення головки. Площина 2 притискається за допомогою пружин до поверхні полімерного виробу. Рухи в межах канавки контролюються датчиками 7, 8. Магнітно-абразивний порошок засипається в ємність 4 і за допомогою трубки 5 разом зі стиснутим повітрям подається в канавку. В межах ділянки між штирьками системою зміни тиску повітря (від 0,5 атм до 12 атм) регулюється швидкість переміщення часточок, а індукцією електромагнітного поля – траєкторія їх переміщення. Після потрапляння до висмоктувальної трубки 6 часточки знову надходять у ємність 4, яка працює як циклон, різко знижуючи швидкість повітряного потоку, що обумовлює падіння часточок порошку на дно. Надлишки повітря виходять через фільтр, вмонтований у кришку ємності.

З метою оцінювання ефективності використання магнітно-абразивного полірування для фінішної обробки ПС за рекомендаціями статті [9] були вибрані властивості абразивного порошку (розмір часточок, форма, матеріал) та технологічні параметри процесу (частота та амплітуда коливання часточок, сила дії магнітного поля, швидкість подачі часточок).

Склад магнітно-абразивного порошку підібраний згідно з рекомендаціями статті [4] щодо можливості проникнення часточок абразиву твердістю H_a у поверхню полімерного матеріалу твердістю H_M :

$$H_a / H_M > 2,5. \quad (1)$$

Встановлено, що найкраще такі вимоги задовольняє порошок, отриманий із розплаву складу Fe – С – Si – Ti з твердістю НВ 1880, де залізо виконує роль магнітної матриці [10]. Для забезпечення високої якості поверхонь складного профілю вибрана сферична форма часточок порошку, які при взаємодії мають вигладжувати мікронерівності.

Для забезпечення періодичної переорієнтації та перемішування гранул у робочій зоні у полірувальній головці встановлено режим пульсації магнітного поля з середнім рівнем магнітної індукції B 0,8 Тл. Повітря подається у робочу зону під тиском 1 атм, що відповідає швидкості переміщення часточки $v = 20$ м/с [10].

Схему проникнення абразивної часточки в поверхню полімеру під дією магнітного поля можливо зобразити таким чином (рис. 4). Припускаємо, що полірувальні часточки сферичної форми діаметром d під дією магнітного поля зіштовхуються з поверхнею полістиролу з силою F_M та проникають на глибину h .

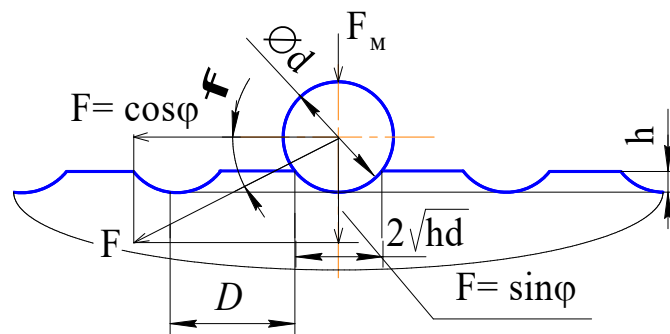


Рис. 4. Схема проникнення абразивної часточки в поверхню полімеру при поліруванні

Діаметр лунки згідно з статтею [4] у першому наближенні дорівнює $2\sqrt{hd}$. Важливим параметром у цьому виразі, що характеризує шорсткість обробленої поверхні, є глибина проникнення часточки h . Її переміщення за певний час можна описати як

$$y = \frac{a}{2} \sin(2\pi ft), \quad (2)$$

де a – амплітуда коливання часточки; f – частота коливань.

Обидва параметри задаються при налаштуванні магнітної головки.

Максимальну швидкість можна визначити як

$$\dot{y}_{\max} = \pi a f. \quad (3)$$

Кінетична енергія E коливного руху часточки під дією магнітного поля визначатиметься за формулою

$$E = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{6} d^3 \rho \right) \pi^2 a^2 f^2, \quad (4)$$

де ρ – щільність полірувальної часточки.

Оскільки енергія E поглинається поверхнею полімеру після зіткнення, то робота, яка при цьому виконується, дорівнюватиме:

$$W = \frac{1}{2} F_M h. \quad (5)$$

Силу F_M можна визначити через середній тиск $\bar{\sigma}$, що діє на поверхню, яка обробляється:

$$F_M = \bar{\sigma} \pi h d. \quad (6)$$

Підставляючи формулу (6) у вираз (5) та прирівнюючи з формулою (4), знаходимо глибину проникнення часточки:

$$h = \pi a f d \sqrt{\frac{\rho}{6\sigma}}. \quad (7)$$

Змінюючи частоту коливання f від 25 Гц до 50 Гц та діаметр абразивної часточки d від 50 мкм до 400 мкм при постійних значеннях амплітуди коливань, розрахуємо глибину проникнення абразивної часточки з щільністю $\rho = 7\,900 \text{ кг/м}^3$. Значення тиску $\bar{\sigma}$, за якого відбувається зрізання ПС, згідно з експериментальними даними статті [10] вибираємо 26 МПа. Всі розрахунки та графічні залежності виконано у табличному процесорі Microsoft Excel. Для забезпечення необхідного рівня шорсткості межею допустимого значення h є діапазон від 0,1 мкм до 0,3 мкм.

Аналіз отриманих даних (рис. 5, а) показує, що за постійної амплітуди коливань $a = 0,4 \text{ мм}$ і частоти коливань від 25 Гц до 30 Гц рівень шорсткості $R_a \leq 0,1 \text{ мкм}$ формується абразивним порошком всіх розглядаємих розмірів. Зі збільшенням частоти коливань можливість використання всього набору порошоків зменшується: при значенні $f = 50 \text{ Гц}$ порошки розміром $d > 250 \text{ мкм}$ слід виключити з розгляду. При цьому ступінь впливу розміру часточок порошку на шорсткість поверхні набагато більша, ніж вплив частоти коливань часточок.

Збільшення амплітуди коливань до $a = 0,8 \text{ мм}$ у тому самому діапазоні частоти коливань f від 25 Гц до 50 Гц виключає можливість використання порошоків зернистістю $d > 250 \text{ мкм}$, оскільки рівень шорсткості зростає від 50 % до 53 %, порівнюючи з попередніми дослідженнями, і сягає значень h від 1,07 мкм до 2,8 мкм (рис. 5, б). Відповідно, найбільшу ймовірність забезпечення необхідної якості поверхні має режим полірування з частотою коливань f від 25 Гц до 35 Гц та діаметром часточок порошку d від 50 мкм до 200 мкм.

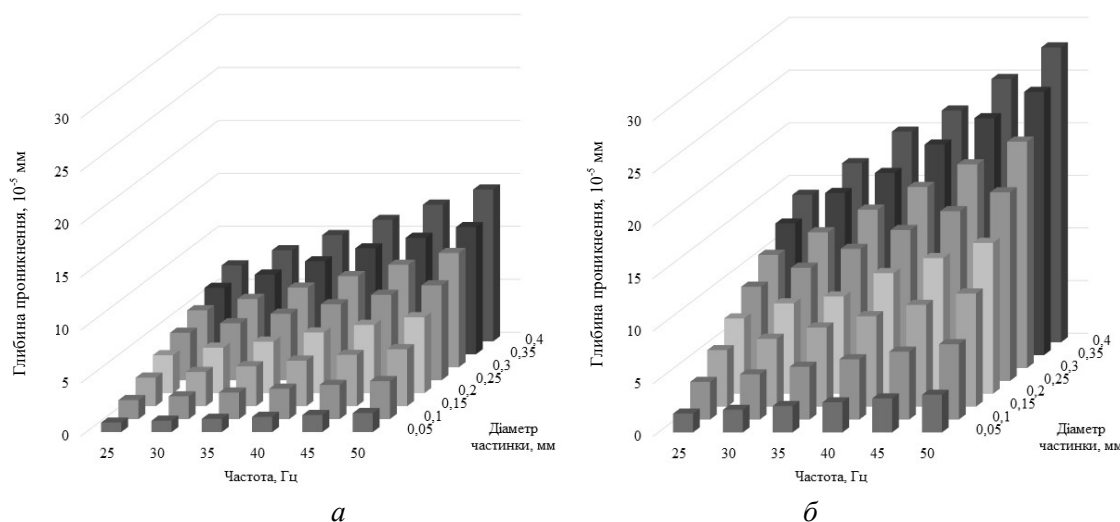


Рис. 5. Зміна глибини проникнення абразивної часточки у поверхню ПС залежно від амплітуди коливань: а – амплітуда 0,4 мм; б – амплітуда 0,8 мм

Враховуючи, що при більшій амплітуді коливань часточок зняття припуску відбувається за менший проміжок часу, для абразивного порошку $d = 200 \text{ мкм}$ визначимо можливість гнучкого регулювання магнітної головки (варіювання амплітуди коливань) для частоти коливань $f = 35 \text{ Гц}$ (рис. 6).

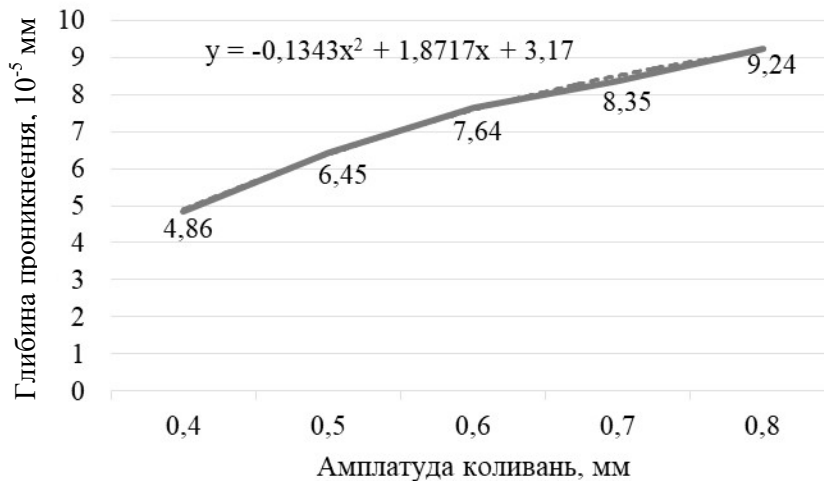


Рис. 6. Зміна глибини проникнення абразивної часточки $d = 200$ мкм у поверхню ПС залежно від амплітуди коливань при частоті коливань $f = 35$ Гц

Як видно, кожне наступне збільшення амплітуди коливань на 0,1 мм призводить до зростання рівня шорсткості від 0,01 мкм до 0,02 мкм, що слід враховувати за необхідності підвищити продуктивність процесу.

Висновки

Виробництво полімерних сцинтиляційних виробів для чутливих елементів дозиметрів має відповідати високим вимогам до якості поверхонь. Створюючи прилади нового покоління, особливу увагу слід приділити якості внутрішніх поверхонь канавок, в які вкладаються світловоди. Для визначення найбільш раціональних умов фінішного етапу виробництва полістирольних сцинтиляторів з канавкою петлеподібного профілю були вирішені такі задачі.

1. Запропоновано математичний опис взаємодії абразивної часточки з поверхнею полімеру під дією магнітного поля з урахуванням амплітуди та частоти коливань часточок абразиву, їх розміру, щільності та зусилля, що потрібне для зняття припуску. Для кількісного оцінювання рівня шорсткості, що формується при поліруванні, взято глибину проникнення абразивної часточки у поверхню ПС.

2. Встановлено, що найбільше впливає на шорсткість поверхні полімеру розмір абразивних часточок. Визначено, що для формування рівня шорсткості $R_a \leq 0,1$ мкм може бути використаний абразивний порошок Fe – C – Si – Ti з часточками сферичної форми, зернистістю d від 50 мкм до 400 мкм при амплітуді коливань $a = 0,4$ мм та частоті f від 25 Гц до 30 Гц. За потреби підвищення продуктивності процесу амплітуду коливань слід встановлювати на рівні $\leq 0,8$ мм, а розмір зерна вибирати ≤ 200 мкм.

Перелік джерел посилання

1. Новини Національної гвардії України URL: <https://ngu.gov.ua/ua/news/pidrozdzily-rhb-zahystu-zahidnogo-oto-nacgvardiyi-treनुalys-na-lvivshchyni>. (дата звернення: 01.11.2020).
2. Харжеєв Ю. Н. Сцинтиляционные счетчики в современных экспериментах по физике высоких энергий. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. 2015. Т. 46. Вып. 4. С. 1241–1248.
3. Review on the progress of ultra-precision machining technologies / Yuan J. et al. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2017. V. 12(2). P. 158–180.
4. Guo H., Wu Y. Ultrafine polishing of optical polymer with zirconia-coated carbonyl-iron-particle-based magnetic compound fluid slurry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. V. 85. P. 253–261.

5. Chen F., Miao X., Tang Y. A review on recent advances in machining methods based on abrasive jet polishing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. V. 90. P. 785 – 799.
6. Кордонский В. И., Городкин С. Р. Магнитореологическое полирование оптических поверхностей. *Оптический журнал*. 2012. № 9. С. 81 – 95.
7. Singh A. K., Jha S., Pandey P. M. Nanofinishing of a typical 3D ferromagnetic workpiece using ball end magnetorheological finishing process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012. V. 63. P. 21–31.
8. Физика сцинтилляторов. Материалы, методы, аппаратура / гл. ред. Б. В. Гринев. Харьков : ИСМа, 2015. 270 с.
9. Полищук В. С. Магнитно-абразивная обработка – высокоэффективный метод в машиностроении. *Физика и техника высоких давлений*. 2003. Т. 13. № 1. С. 127 – 138.
10. Оликер В. Е., Жорняк А. Ф., Супрун Г. Ф. Обработка пластмасс магнитно-абразивными порошками. *Порошковая металлургия*. 1985. № 5. С. 70–74.

Стаття надійшла до редакції 13.11.2020 р.

УДК 621.923

О. В. Титаренко, Н. В. Зубкова, С. А. Новак

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО ПОЛИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДОЗИМЕТРОВ

Продлить долговечность функционирования чувствительных элементов дозиметров – главное требование к производителям современных приборов радиационной разведки и контроля. Предложенные решения по усовершенствованию конструкции изделий предусматривают использование оптических световодов и соответственное формирование канавок петлеобразного профиля в готовом чувствительном полимерном элементе. Рассмотрены потенциальные возможности использования магнитно-абразивного полирования для финишной обработки поверхностей канавки чувствительных элементов дозиметров с целью повышения их надежности и безопасности. Для выбранной конструкции полировальной головки предложены материал, форма частиц порошковой композиции и параметры процесса. Исследовано влияние частоты и амплитуды колебания частиц на глубину их внедрения в поверхностный слой полимера.

К л ю ч е в ы е с л о в а: магнитно-абразивное полирование, органические пластические сцинтилляторы, полистирол, оптические световоды, канавка, частицы порошка, амплитуда колебаний, частота колебаний, шероховатость поверхности.

UDC 621.923

O. Titarenko, N. Zubkova, S. Novak

DETERMINING OF MAGNETIC ABRASIVE POLISHING OF OPTICAL POLYMERS FOR SENSITIVE ELEMENTS OF RADIATION INDICATORS

Extending the durability of functioning of the sensitive elements of radiation indicators and increasing their reliability and safety are the main requirements for producers of modern radiation reconnaissance and monitoring devices. The proposed solutions for construction improving of products provide for the usage of optical fibers and the corresponding formation of loop-shaped channels in the finished sensitive polymer element. Potential possibilities of using magnetic abrasive polishing for finishing channel surfaces are considered. For the chosen construction of the polishing head, the material and form of the powder particles composition and the process parameters are proposed. The effect of the frequency and amplitude of

vibration of abrasive particles on the depth of their penetration into the surface layer of the polymer is investigated. It has been determined that the widest possibilities of using powders of the composition Fe - C - Si - Ti with a diameter of $d = 50 - 400 \mu\text{m}$ have a mode when the pressure of the air flow by feeding particles is maintained at a level of 1 atm, the magnetic induction of the field in the working gap is 0.8 T, the vibration amplitude of the particles is $a = 0.4 \text{ mm}$, and the vibration frequency varies in the range $f = 25 - 30 \text{ Hz}$.

К e y w o r d s: magnetic abrasive polishing, organic plastic scintillators, polystyrene, optical fibers, channel, powder particles, vibration amplitude, vibration frequency, roughness of the surface.

Тітаренко Оксана Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.

<http://orcid.org/0000-0001-6811-7537>

Зубкова Ніна Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М. Ф. Семка Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

<http://orcid.org/0000-0001-8200-7924>

Новак Станіслав Олександрович – курсант Національної академії Національної гвардії України.

<http://orcid.org/0000-0002-6362-1862>