

Вплив параметрів технологічних операцій шліфування та полірування на формоутворення компонентів MOEMS

Олена Чала¹, Олександр Филипенко², Ірина Боцман¹

1. Кафедра КІТАМ, Харківський національний університет радіоелектроніки, УКРАЇНА, Харків, пр. Науки 14, olena.chala@nure.ua

2. Факультет АКТ, Харківський національний університет радіоелектроніки, УКРАЇНА, Харків, пр. Науки 14, oleksandr.filipenko@nure.ua

Анотація У матеріалах приведено результати моделювання процесу формування функціональних поверхонь MOEMS компонентів. Визначено значення та величину факторів, що безпосередньо впливають на процес формування.

Ключові слова: компонент, MOEMS, форма, оптичний перемикач, мікро дзеркало, шліфування, полірування

I. ВСТУП

Одним з багатьох наймасовіших типів MEMS є мікрооптичні електромеханічні системи (MOEMS). Це мікрочіпи з оптичними компонентами, інтегрованими в їх тіло. Здатність виконувати складні операції зі світловим променем (відбиття, дифракція, модуляція, просторова орієнтація) виникає завдяки використанню мініатюрних оптичних елементів і є однією з головних переваг MOEMS.

Експлуатаційні властивості волоконно-оптичних систем передачі залежать від якості компонентів, що використовуються. Необхідні параметри можна гарантувати лише за умови суворого дотримання технологічного процесу їх виробництва та використання високоточного обладнання контролю якості та ефективних алгоритмів обробки даних. [1,2].

Однією з найважливіших операцій у виробничому процесі виробництва MOEMS компонентів є операція формування.

Фінішні операції в такому технологічному процесі – шліфування та полірування відбивної поверхні.

Ця робота присвячена дослідженню параметрів та факторів, які безпосередньо впливають на формування функціональних відбиваючих компонентів у фінішних операціях. Величина шорсткості поверхні відбиваючого елемента є головним показником формування.

II. БАГАТОФАКТОРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ

A Факторне планування експерименту

Для моделювання впливу режимів фінішних технологічних операцій на параметри формування компонентів MOEMS авторами було використано повний факторний експеримент.

Для проведення експерименту необхідно виконати наступне:

- отримати та проаналізувати апіорну інформацію;
- вибрати вхідні та вихідні змінні;
- вибрати математичну модель, за якою будуть представлені експериментальні дані;
- визначити метод аналізу даних;
- провести експеримент;
- перевірити статистичні передумови для отриманих експериментальних даних;
- обробити результати та інтерпретувати їх, а також розробити рекомендації щодо вибору значень параметрів [3] для отримання запланованих значень параметрів обробних операцій при формуванні компонента MOEMS.

Ми проведемо повний факторний експеримент, щоб забезпечити контроль технологічних процесів формування кремнієвих підкладок відбиваючих елементів при поліруванні та шліфуванні різними типами алмазних шліфувальних паст (АСМ 2/1, АСМ1 4/10, АСМ 0/28).

B. Вибір факторів та їх інтервали варіювання

Як відомо [4-14], найбільш значущими вхідними факторами завершальних технологічних операцій формування, що відповідають усім вимогам факторного експерименту, є час обробки зразка - t (хв), швидкість обертання шпинделя - v (об/хв) і зернистість пасти для полірування та шліфування - z (мкм).

Слід зазначити, що при виборі факторів не було враховано один з значущих параметрів – тиск інструменту полірування, який діє на зразок. У всіх проведених дослідках тиск був сталою та одноковою величиною.

Межі зміни факторів: максимальний час обробки матеріалу в межах $t_{max} = 20$ хв., а мінімальний $t_{min} = 10$ хв.; швидкість обертання диска – $v_{max} = 40$ об/хв, $v_{min} = 30$ об/хв.; зернистість пасти – $z_{max} = 32$ мкм, $z_{min} = 2$ мкм. Варіантні фактори, перелічені в таблиці 1.

Плануванню експерименту передують етап визначення центру експерименту і інтервалів варіювання факторів. При цьому оцінюються

границі областей визначення факторів, що задаються технічними обмеженнями [3].

Табл. 1. Межі змін і проектування факторів

Фактори	Час обробки, хв	Швидкість обертання диска, (об/хв)	Зернистість паст, мкм	Шорсткість, мкм
Прийняте позначення	t	v	z	Ra
Позначення в МФЕ	x1	x2	x3	Y
Верхня межа (1)	20	40	32	-
Основний рівень(0)	15	35	17	-
Нижня межа (-1)	10	30	2	-

Оскільки істинний вид базової функції (2) невідомий, то для опису поверхні відгуку будемо використовувати рівняння, що представляє собою розкладання цієї функції в ряд [3]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{ij=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2, \quad (2)$$

де x_i, x_j – змінні фактори при $1 \dots n, j=1 \dots n, i \neq j$;
 b_0, b_i, b_{ij} – коефіцієнти регресії при відповідних змінних, значення яких визначають форму поверхні відгуку. Розраховані числові значення коефіцієнтів регресії занесені в таблицю 1.

На підставі проведених досліджень [4] обираємо чинники, від яких залежить результуюча величина шорсткості матеріалу Y (мкм) [3].

Складаємо узагальнену формулу залежності:

$$Y = f(t, v, z) \quad (1)$$

де t, v, z – фактори, що впливають на величину Y. Побудуємо матрицю проведення повного факторного експерименту, а результати занесемо до таблиці 2.

Табл. 2. Результати проведення повного факторного експерименту

№	t	v	h	x1	x2	x3	x1*x2	x1*x3	x2*x3	x1*x2*x3	x1/x^2-d	x2/x^2-d	x3/x^2-d	y
1	20	40	32	1	1	1	1	1	1	1	0,2697	0,2697	0,2697	44,1
2	10	40	32	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,2697	0,2697	0,2697	20,6
3	20	30	32	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,2697	0,2697	0,2697	35,7
4	10	30	32	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,2697	0,2697	0,2697	17,9
5	20	40	2	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0,2697	0,2697	0,2697	12,2
6	10	40	2	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,2697	0,2697	0,2697	5,8
7	20	30	2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,2697	0,2697	0,2697	9,7
8	10	30	2	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,2697	0,2697	0,2697	4,5
9	24,308	35	17	1,2154	0	0	0	0	0	0	0,7469	-0,7303	-0,7303	28,4
10	7,846	35	17	-1,2154	0	0	0	0	0	0	0,7469	-0,7303	-0,7303	8,1
11	15	48,616	17	0	1,2154	0	0	0	0	0	-0,7303	0,7469	-0,7303	30,2
12	15	23,538	17	0	-1,2154	0	0	0	0	0	-0,7303	0,7469	-0,7303	14,7
13	15	35	38,8928	0	0	1,2154	0	0	0	0	-0,7303	-0,7303	0,7469	46,6
14	15	35	1,5692	0	0	-1,2154	0	0	0	0	-0,7303	-0,7303	0,7469	3,8
15	15	35	17	0	0	0	0	0	0	0	-0,7303	-0,7303	-0,7303	22,6

Перевірка статистичної значущості параметрів регресійного рівняння (коефіцієнтів регресії) виконувалася за t-критерієм Стьюдента [3, 10].

Було визначено дисперсію відтворюваності [3] Розраховані числові значення дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії занесені в табл. 3.

Рівняння регресії (3) в кодованому вигляді має таке значення:

$$y = 20,33 - 5,17x_1 + 2,25x_2 + 9,21x_3 + 1,98x_1x_3 \quad (3)$$

Для оцінки адекватності моделі було проведено її оцінку за критерієм Фішера. Знайдемо кодовані розрахункові значення згідно з отриманим рівнянням регресії.

Табл.3. Розраховані числові значення дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії

Коефіцієнти регресії	Перевірка коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента				
	Чисельне значення	S ² _{bi}	t _{bi}	Табличне значення коэф. Стьюдента	Перевірка значущості
b0	20,33	0,418	31,456	1,886	Значний
b1	5,17	0,572	6,839	1,886	Значний
b2	2,25	0,572	2,975	1,886	Значний
b3	9,21	0,572	12,177	1,886	Значний
b12	0,46	0,783	0,520	1,886	Не значний
b13	1,98	0,783	2,238	1,886	Значний
b23	0,49	0,783	0,550	1,886	Не значний
b123	0,30	0,783	0,339	1,886	Не значний
b11	-1,22	1,435	1,016	1,886	Не значний
b22	-0,39	1,435	0,325	1,886	Не значний
b33	0,15	1,435	0,127	1,886	Не значний

Результати кодованих розрахункових експериментальних значень відгуку функції занесено до таблиці 4.

Таблиця 4. Результати кодованих розрахункових експериментальних значень відгуку функції

№ дос	\bar{Y}_n , мкм	\bar{Y}_k , мкм
1	44,1	38,9
2	20,6	24,6
3	35,7	34,4
4	17,9	20,1
5	12,2	16,6
6	5,8	10,2
7	9,7	12,1
8	4,5	5,7
9	28,4	36,6
10	8,1	14
11	30,2	23,1
12	14,7	17,6
13	46,6	31,5
14	3,8	9,1
15	22,6	20,3

III. ВИЗНАЧЕННЯ СТУПЕНЮ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ НА ФОРМОУТВОРЕННЯ МОЕМС-КОМПОНЕНТІВ

Для отримання поверхні відгуку кожен з трьох факторів було зафіксовано на нульовому рівні: $t=15$ хв, $v=35$ об/хв, $z=17$ мкм.

Підставивши ці значення, було розкодовано рівняння регресії, та отримано три рівняння з двома факторами [3].

Для декодування рівнянь (4-6) було проведено заміну x_i на натуральні значення:

$$x_1 = \frac{t-15}{5} = 0,2t - 3. \quad (4)$$

$$x_2 = \frac{v-35}{5} = 0,2v - 7. \quad (5)$$

$$x_3 = \frac{z-17}{15} = 0,057z - 1,13. \quad (6)$$

Після декодування (формула 7) стала мати вигляд:

$$y(t, v, h) = 20,33 + 5,17(0,2t - 3) + 2,25(0,2v - 7) + 9,21(0,05z - 1,13) + 1,98(0,2 - 3)(0,005z - 1,13). \quad (7)$$

Після виконання перетворень і скорочень, отримаємо рівняння (8-11):

$$y(t, v, h) = 0,58652 \cdot 15 + 0,45v + 0,1635z + 0,0198tz - 14,6251 \quad (8)$$

$$y_t=15(v, z) = 0,45 \cdot v + 0,4605 \cdot z - 5,8273 \quad (9)$$

$$y_v=35(t, z) = 0,58652t + 0,1635z + 0,0198tz + 1,1249 \quad (10)$$

$$y_z=17(t, v) = 0,92312 \cdot t + 0,45 \cdot v - 1,1249 \quad (11)$$

IV. ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Побудовані за отриманими рівняннями поверхні відгуку представлені на рисунках 1

(двовірному варіанті) 2– 4 (тривимірному варіанті).

За отриманими графіками було проведено оцінку впливу кожного фактору (або комбінації факторів) технологічних операцій на параметри формоутворення МОЕМС-компоненту.

Було визначено величини та комбінацію факторів для отримання запланованої шорсткості дослідного зразка.

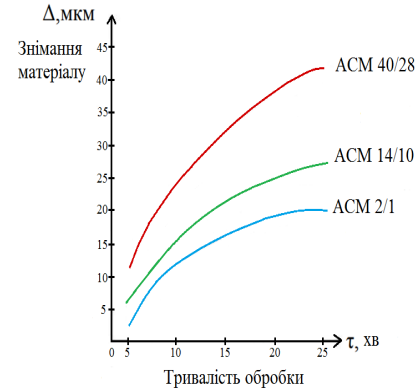


Рис. 1. Залежність знімання матеріалу від тривалості обробки

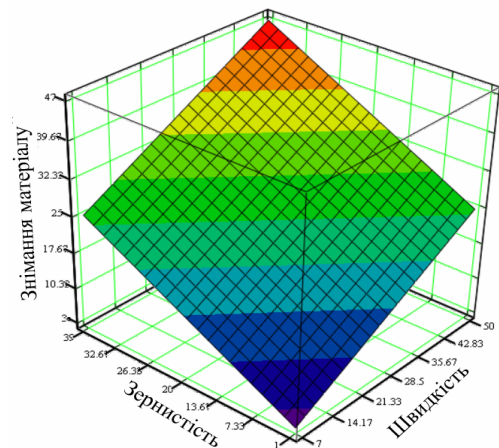


Рис. 2. Поверхня відгуку при фіксованому значенні часу обробки

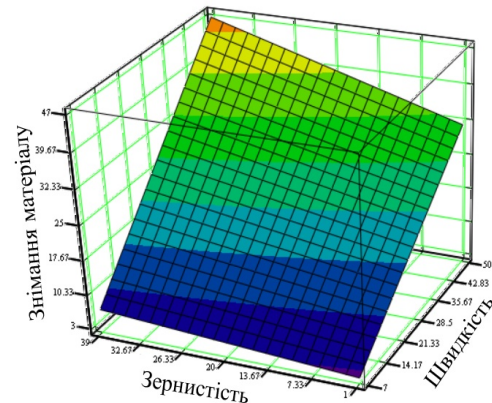


Рис. 3. Поверхня відгуку при фіксованому значенні швидкості обороту шпинделя

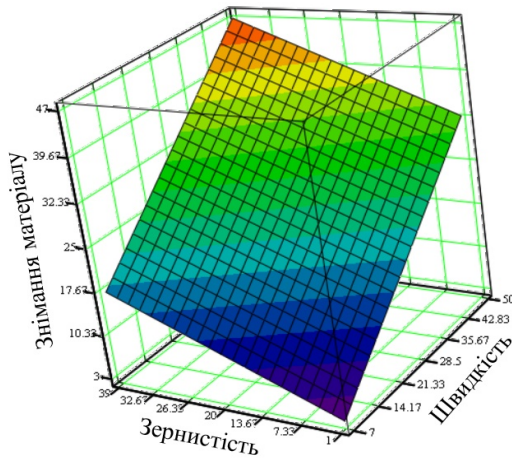


Рис.4. Поверхня відгуку при фіксованому значенні зернистісті алмазної пасти

V. ВИСНОВКИ

У статті представлено результат дослідження впливу параметрів технологічних операцій шліфування та полірування на параметри формування компонентів МОEMS.

Моделювання дозволяє визначити заданий і величину вхідних параметрів для отримання заданих значень шорсткості вихідного зразка.

Результати моделювання можуть бути корисними при плануванні технологічних процесів виробництва функціональних світловідбиваючих елементів МОEMS. Це дослідження дасть можливість визначити точні значення параметрів формування компонентів, наприклад, дзеркал, для мікро-оптоелектромеханічних вимикачів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] A.I. Filipenko and B.A. Malik, "Precision Control of the Components of the Fiber-Optic Data Transmission System," *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 51, no. 4, pp. 29-31, 1997.
- [2] T. Bifano, "Shaping light: MOEMS deformable mirrors for microscopes and telescopes," in *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, MEMS Adaptive Optics IV*, vol. 7595, San Francisco, 2010, pp.7595-02.
- [3] F. Zamkotsian, P. Lanzoni, R. Barette, M. Helmbrecht, F. Marchis and A. Teichman, "Cryogenic testing of MOEMS deformable mirror for future optical instrumentation," in *2017 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN)*, Santa Fe, NM, 2017, pp. 1-2.
- [4] A. Tortschanoff, M. Baumgart, D. Holzmann, C. Mayer, T. Sandner and A. Kenda, "Optical position detection for MOEMS scanner mirrors with arbitrary trajectories," in *2014 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics*, Glasgow, 2014, pp. 135-136.
- [5] M. Baumgart, and A. Tortschanoff, "Design rules for a compact and low-cost optical position sensing of MOEMS tilt mirrors based on a Gaussian-shaped light source," in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Modeling Aspects in Optical Metrology IV*, vol. 8789, Munich, 2013, p. 87890A.
- [6] I. Neviudov, S. Maksymova, A. Funkendorf, O. Chala and K. Khrustalev, "Using MEMS to adapt ultrasonic welding processes control in the implementation of modular robots assembly processes", in *XIV-th International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, pp. 223-226, 2018.
- [7] A.I. Filipenko and O.V. Sychova, "The analysis of creation perspectives of photonic crystal fiber components", *8th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM)*, pp. 143-145, 2006.
- [8] U. Koch, C. Hoessbacher, A. Emboras and J. Leuthold, "Optical memristive switches", *J Electroce.ram*, vol. 39, no. 1-4, pp. 239250.
- [9] YY. Zhao, M. Chen, F. Xia, L. Cai, X. Li, "Small Curvature Sensor Based on Butterfly-Shaped Mach-Zehnder", *Interferometer. IEEE Trans Electron Devices*, vol. 64, no. 11, pp. 4644-4649, 2017.
- [10] B. Malyk, O. Tokarieva and S. Malyk-Zamorii, "Optical fiber structures performance enhancement under the conditions of ionizing radiation high power levels," in *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 2 (114), 2018, pp. 13-18.
- [11] B. Malyk and S. Malyk-Zamorii, "Matching elements development method investigation for electromagnetic field parameters conversion under emission launching into optical fibers of different types," in *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkov, 2017, pp. 292-294.
- [12] I. Neviudov, V. Bortnikova, O. Chala, and S. Maksymova, "Modeling MEMS Membranes Characteristics," *2018 XXVI-th International Ukrainian-Polish Scientific and Technical Conference CAD in machinery design implementation and educational issues (CADMD)*, Lviv, 2018, pp. 61-68.
- [13] Филипенко О. І. Технологічні фактори виробництва, що впливають на якість покриттів дзеркальних поверхонь МОEMS-перемикачів / О. І. Филипенко, О. О. Чала, М. І. Відешин // *Наукові нотатки*. - 2017. - Вип. 57. - С. 178-183
- [14] Невлюдов И. Ш., Палагин В. А., Чалая Е. А. Технологии микросистемной техники (часть II) // *Технология приборостроения*. – 2015. – №. 2. – С. 5-10.
- [15] Filipenko O. I., Chala O. O., Videshyn M. I. Технологічні дефекти виробництва кремнієвих підкладок для функціональних відбиваючих поверхонь МОEMS-перемикачів // *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. – 2017. – Т. 2. – №. 42. – С. 61-63.
- [16] Filipenko, O., Chala, O., & Sychova, O. (2018, October). Some Issues of Dependencies of Loss from Technological Features of Optical Switches for Communication Systems. In *2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)* (pp. 599-603). IEEE