

OPTINIŲ DETALIŲ POLIRAVIMO PROCESO EKSPERIMENTINIO TYRIMO PLANAVIMAS

Ieva ŠVAGŽDYTĖ¹, Mindaugas JUREVIČIUS²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

El. paštas: ¹ieva.svagzdyte@vgtu.lt; ²mindaugas.jurevicius@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje aprašomas optinių detalių poliravimo procesas, naudojamosios technologijos ir medžiagos. Optinėms detalėms keliami aukšti tikslumo reikalavimai – paviršiaus glotnumo, defektų nebuvimo, formos nuokrypių ir kt., jie gaunami poliravimo proceso metu. Mokslininkų paskelbtuose tyrimuose pateikiami modeliavimo rezultatai, gauti eksperimentų metu, tirtos įvairios apdirbamosios medžiagos, jų paviršiaus kokybė, poliruota įvairiais pjovimo režimais. Šiame straipsnyje aprašomas eksperimento planas, skirtas plokščioms detalėms iš optinio stiklo BK7 poliruoti, kai varijuojama keliais apdirbimo režimais. Siekiama gauti aukštą gaminių kokybę daugiakriterio optimizavimo būdu.

Reikšminiai žodžiai: BK7, eksperimento planas, kintamieji poliravimo procese, paviršiaus kokybė, poliravimas.

Įvadas

Poliravimą būtų galima apibūdinti kaip mechaninio apdirbimo procesą, kai nuo apdirbamo paviršiaus pašalinamas medžiagos sluoksniu. Gaminant optines detales (lęšius, stiklus, prizmes, veidrodžius ir kita) svarbu užtikrinti aukštą jų kokybę.

Optinės detalės gaminamos iš įvairių kristalų ir optinių stiklų, medžiaga parenkama priklausomai nuo detalės paskirties, prietaiso, kuriame bus naudojama, tikslumo, kitų parametrų. Optinės detalės kokybę galima apibūdinti keliais rodikliais:

- medžiagos (lūžio rodiklis, dispersijos koeficientas, kietumas, tirpumas vandenyje);
- paviršiaus (šiurkštumas, įbrėžimai, išplėšimai);
- detalės (paviršių plokštumas, lygiagretumas – plokščioms detalėms, matmens tikslumas, nuožuolos dydis).

Šie ir kiti kokybę apibūdinantys rodikliai kontroliuojami interferometrais, profilometrais, tiksliais kampamačiais ir kitais prietaisais.

Poliravimo technologijos

Poliruojant pagrindinį mechaninį darbą atlieka abrazyvinė medžiaga. Paprastai į pjovimo zoną tiekama suspensija, kurios pagrindą sudaro abrazyvinės dalelės ir vanduo, sumaišytos reikiamomis proporcijomis. Abrazyvinių dalelių medžiaga priklauso nuo poliruojamos detalės medžiagos

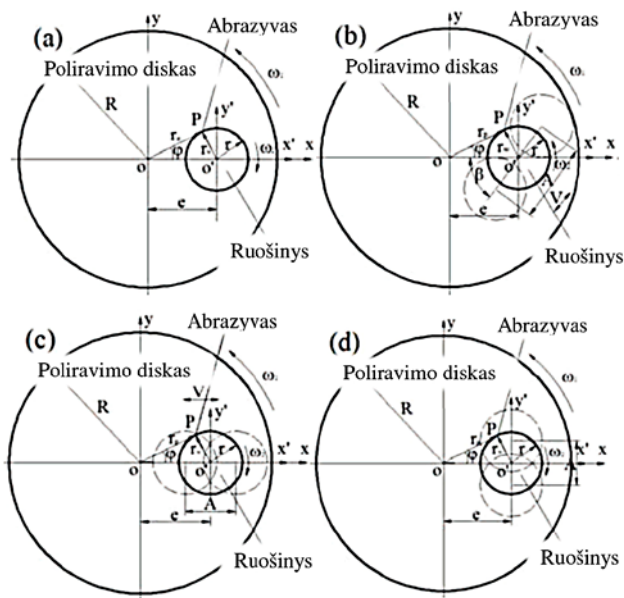
(pvz., safyro kristalams dažniausiai naudojami deimantiniai grūdėliai), o dydis – nuo poliravimo pakopos, t. y. jei poliravimas galutinis, grūdelių dydis gali nesiekti 1 mikrometro.

Poliruoto paviršiaus kokybę taip pat priklauso nuo judesio trajektorijos (poliravimo disko ir ruošinio), užspaudimo jėgos.

Mokslininkai iš Kinijos (Pan *et al.* 2012) sudarė kinematinį plokščių detalių mechaninio ir magnetinio poliravimo proceso trajektorijos modelį. Tirta, kokią įtaką paviršiaus kokybei turi poliravimo disko greitis, ruošinio greitis, ekscentricitetas, svyravimo greitis ir abrazyvo trajektorijos amplitudė (1 pav.).

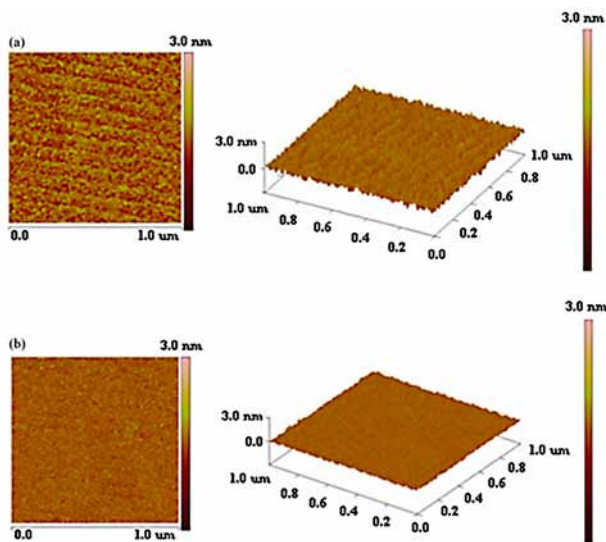
Sumodeliuoti procesai buvo įgyvendinti praktiškai poliruojant SiC detales, nustatyta, kad geriausia paviršiaus kokybė (mažiausias šiurkštumas) gauta, kai poliravimo padas ir ruošinys sukasi priešingomis kryptimis, ekscentricitetas didesnis, o svyravimo amplitudė mažesnė pagal kiekvieną atvejų nustatomus parametrus.

Poliruojant lengvai magnetinėmis karbonilinėmis geležies dalelėmis, susiduriama su korozijos problemomis, dėl to suprastėja paviršiaus kokybė. Atlikti tyrimai su polimerais ar kitomis neorganinėmis medžiagomis padengtomis geležies dalelėmis, reguliuojant sukimosi greitį ir magnetinio lauko intensyvumą. Esant didesniam sukimosi greičiui pagreitėja medžiagos pašalinimas iš apdirbimo zonos, paviršiaus šiurkštumas mažesnis esant mažesniai magnetinio lauko intensyvumui (Lee *et al.* 2015).



1 pav. Baigiamojo mechaninio ir magnetinio poliravimo kinematinis modelis: a – poliravimas esant užtikrintam ekscentricitetui; b – poliravimas linijinės interpoliacijos svyravimo amplitude, neišlaikant pastovaus ekscentriciteto; c – poliravimas kintančiu ekscentricitetu X kryptimi; d – poliravimas kintančiu ekscentricitetu Y kryptimi

Fig. 1. Kinematics model of ultra-smooth polishing based on cluster MR effect (a) Certain eccentricity polishing (b) Linear interpolation swing uncertain eccentric polishing (c) X direction uncertain eccentricity polishing (d) Y direction uncertain eccentricity polishing



2 pav. Paviršiai po cheminio mechaninio poliravimo (a) ir po cheminio mechaninio poliravimo aukštadažniais virpesiais (b)

Fig. 2. Polished surfaces of (a) traditional chemical mechanical polishing and (b) ultrasonic flexural vibration chemical mechanical polishing

Cheminį ir mechaninį poliravimą galima papildyti procesais, gerinančiais paviršiaus kokybę. Poliruoiant safyrą buvo sukelti aukštadažniai (ultragarsiniai) virpesiai (2 pav.).

Didesnis nupoliruotos medžiagos pašalinimo greitis, mažesnis paviršiaus šiurkštumas ir geresnis plokštumas buvo gautas pridėjus ultragarsines vibracijas. Tačiau poliravimo procesas užtruko beveik dvigubai ilgiau (Xu *et al.* 2010).

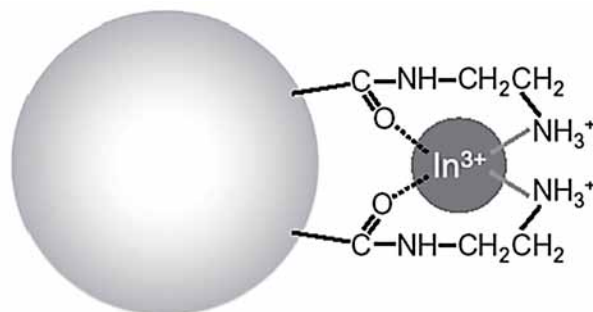
Abrazyvinių dalelių dydis parenkamas priklausomai nuo atliekamos operacijos: kuo glotnesnį paviršių siekiama gauti, tuo mažesnės turėtų būti dalelės. Atlikti silicio karbido 4H-SiC poliravimo bandymai naudojant trijų skirtingų dydžių abrazyvines daleles. Nustatyta, kad mažesnis paviršiaus šiurkštumas gautas naudojant mažesnio dydžio abrazyvines daleles SiO₂, taip pat poliruoiant ilgesnį laiką. Šešiakampė kristalo struktūra labiau pažeidžiama, kai naudojamos didesnės abrazyvinės dalelės (Shi *et al.* 2014).

Cheminio mechaninio poliravimo procese suspensija gali būti papildyta cheminiais priedais, kad poliravimas vyktų labiau dėl cheminio, o ne dėl mechaninio proceso. Atlikti eksperimentai, poliruoiant skaidrų elektrai laidų oksidą, naudojant indžiu jonizuotus sferinius polimetilakrilato abrazyvo grūdelius (3 pav.).

Gautas paviršiaus šiurkštumas analogiškas gautam po poliravimo neorganiniu abrazyvu. Tačiau, naudojant šį abrazyvą, pavyko išlaikyti reikiamą gaminio laidumą (Nagaoka *et al.* 2015).

Pati abrazyvinė medžiaga parenkama pagal poliruojamąją medžiagą, t. y. kuo kietesnė optinė detalė, tuo kietesnis turi būti ir pats abrazyvas. Daugelyje prietaisų naudojamas optinis stiklas BK7 gali būti poliruojamas korundu, retųjų Žemės elementų oksidais ir panašiomis abrazyvinėmis medžiagomis.

Atliekant eksperimentus paprastai pasirenkamas vienas ar keli kintamieji, juos keičiant pagal nustatytas ribas tikrinami gauti rezultatai. Dažniausiai apdirbimo rekomendacijos parengiamos konkrečioms apdirbamoms medžiagoms ar poliravimo technologijoms.



3 pav. Indžiu jonizuotų sferinių polimetilakrilato abrazyvinių grūdelių sandara

Fig. 3. Structure of the abrasive material PMA toward In³⁺

Eksperimento aprašymas

Siekiant sudaryti poliravimo technologiją, kurią būtų galima pritaikyti įvairioms medžiagoms ir staklėms (keičiant poliravimo režimus), pravartu atlikti tyrimus varijuojant keletu apdirbimo režimų. Tai galima padaryti sudarius eksperimento planą su keliais kintamaisiais.

Eksperimentams pasirinkta medžiaga – optinis stiklas BK7 (arba B270). Tai vienos dažniausiai optikoje naudojamų medžiagų.

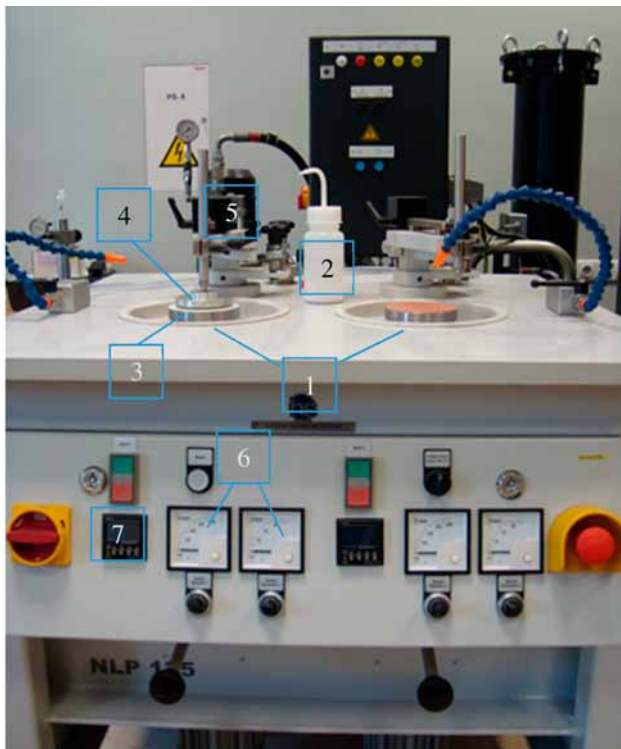
Pirmiesiems bandymams pasirinkti keturi kintamieji:

- suspensijos tiekimo į apdirbimo zoną debitas, ml/min.;
- poliravimo pado sukimosi dažnis, aps./min.;
- poliravimo trukmė, min.;
- užspaudimo jėga, g/cm².

Pasirinkta poliruoti plokščius stiklus, ruošinių dydis, poliravimo padas, abrazyvinių dalelių sudėtis ir tipas bei kiti parametrai pasirenkami laisvai ir laikomi konstantomis.

Eksperimentai bus atliekami dviejų suklių plokščio poliravimo staklėmis NLP 125 HS-2 (4 pav.).

Šiomis dviejų suklių 1 poliravimo staklėmis galima vienu metu poliruoti keletą detalių ar jų rinkinių arba, atskyrus darbo zonas, poliruoti skirtingas medžiagas skirtingomis sąlygomis. Abrazyvinė suspensija 2, siekiant išlaikyti pastovų jos tiekimą į apdirbimo zoną, bus tiekiamas



4 pav. Poliravimo staklės NLP 125 HS-2
Fig. 4. Polishing machine NLP 125 HS-2

automatiškai, poliravimo padas 3 paruošiamas priklausomai nuo apdirbamos medžiagos ir poliravimo etapo, dažniausia būna padengti cerio oksidu arba be jo. Prie laikiklio 4 klijuojami (šiuo konkrečiu atveju) stikliniai ruošiniai, užspaudimo jėga ir judesio ekscentriciteto dydis užfiksuojami (5) prieš poliravimą. Tiek poliravimo pado sukimosi dažnis, tiek ekscentriko judėjimo greitis reguliuojami (6) nepriklausomai vienas nuo kito.

Poliravimo trukmė nustatoma ir užfiksuojama (7), todėl procesas trunka tiksliai tiek, kiek numatyta eksperimento plane.

Bus tikrinamas gautų paviršių šiurkštumas, plokštumas, lygiagretumas, defektų nebuvimas.

Eksperimento planas

Poliravimo technologinio proceso eksperimentui pasirinktas Bokso ir Vilsono (Box ir Wilson) trijų lygių planas. Technologinis procesas aproksimuojamas antrojo laipsnio polinomu:

$$y_e = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{1 \leq j < k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

čia y_e – nagrinėjamo technologinio proceso įvertis; x_i – nepriklausomi kintamieji; k – bendras x_i kintamųjų skaičius arba bendras veiksnių skaičius, čia $i \in \{1, 2, 3, \dots, k\}$; b_0 , b_i , b_{ii} ir b_{ij} – (1) regresijos lygties koeficientų įverčiai. Pavyzdžiui, kai veiksnių skaičius yra trys, t. y. kai $k = 3$, tuomet (1) lygtis gali būti užrašyta taip:

$$y_e = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2. \quad (2)$$

Bendras (1) lygties nežinomųjų, arba b_0 , b_i , b_{ii} ir b_{ij} koeficientų, skaičius apskaičiuojamas pagal tokią lygtį:

$$N_k = \frac{1}{2}(k+1)(k+2). \quad (3)$$

Pirminiam eksperimento planui užsibrėžiame keturis veiksnius, todėl ir matrica sudaroma šiam veiksnių skaičiui (1 lentelė). Eksperimentų planavimo matrica: keturių veiksnių $2^4 + 2 \cdot 4 + 7 = 31$ bandymo planas. -1 ir $+1$ taškuose $2^4 = 16$ bandymų, $-\lambda$ ir λ taškuose $2 \times 4 = 8$ bandymai ir 0 lygio taške (kubo centre) 7 bandymai. Iš viso $N = 31$ bandymas (Lazic 2004).

Sudaromas eksperimento planas, kur x yra veiksniai su nurodytais kitimo lygiais (2 lentelė).

Atlikus bandymus bus nustatomi optimalūs taškai, t. y. bus stengiamasi surasti tokius apdirbimo režimų derinius, kuriems esant galima pasiekti aukščiausią optinių detalių kokybę. Gamyboje bus galima pritaikyti daugiakriterį optimizavimą.

1 lentelė. Trijų lygių keturių veiksnių $24 + 2 \times 4 + 7$ plano eksperimento veiksnių kitimo lygiai

Table 1. 3 levels for 4 factors of $24 + 2 \times 4 + 7$ experiment plan

Eil. Nr.	Veiksny	Veiksnių kitimo lygiai					
		λ				λ	Δx
		-2,000	-1	0	1	2,000	
1	Suspensijos tiekimo debitas, ml/min.	100	150	200	250	300	50
2	Pado sukimosi dažnis, aps./min.	50	100	150	200	250	50
3	Poliravimo trukmė, min	30	45	60	75	90	15
4	Užspaudimo jėga, g/cm ²	10	25	40	55	70	15

2 lentelė. Eksperimento planas

Table 2. Plan of experiment

Bandymo numeris	x_1	x_2	x_3	x_4
1	1	1	1	1
2	-1	1	1	1
3	1	-1	1	1
4	-1	-1	1	1
5	1	1	-1	1
6	-1	1	-1	1
7	1	-1	-1	1
8	-1	-1	-1	1
9	1	1	1	-1
10	-1	1	1	-1
11	1	-1	1	-1
12	-1	-1	1	-1
13	1	1	-1	-1
14	-1	1	-1	-1
15	1	-1	-1	-1
16	-1	-1	-1	-1
17	2	0	0	0
18	-2	0	0	0
19	0	2	0	0
20	0	-2	0	0
21	0	0	2	0
22	0	0	-2	0
23	0	0	0	2
24	0	0	0	-2
25	0	0	0	0
26	0	0	0	0
27	0	0	0	0
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0
30	0	0	0	0
31	0	0	0	0

Išvados

1. Baigiamoji optinių detalių gamybos operacija – poliravimas, kurio metu gaunami aukštos kokybės paviršiai.
2. Sudarytas trijų lygių keturių veiksnių eksperimento planas plokščioms optinėms detalėms iš optinio stiklo BK7 poliruoti.
3. Taikant daugiakriterio optimizavimo sistemą, bus siekiama gauti poliravimo režimų rinkinį, leidžiantį gauti geriausią detalių kokybę.

Literatūra

- Lazic, Ž. R. 2004. *Design of experiments in chemical engineering*. Wiley-vch. 610 p. <https://doi.org/10.1002/3527604162>
- Lee, J. W.; Hong, K. P.; Cho, M. W.; Kwon, S. H.; Choi, H. J. 2015. Polishing characteristics of optical glass using PMMA-coated carbonyl-iron-based magnetorheological fluid, *Smart Materials and Structures* 24(6): <https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/6/065002>
- Nagaoka, S.; Ryu, N.; Yamanouchi, A.; Shirotsaki, T.; Horikawa, M.; Sakurai, H.; Takafuji, M.; Ihara, H. 2015. Chemical mechanical polishing of transparent conductive layers using spherical cationic polymer microbeads, *Thin Solid Films* 576: 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.12.028>
- Pan, J.; Yan, Q.; Xu, X.; Zhu, J.; Wu, Z.; Bai, Z. 2012. Abrasive particles trajectory analysis and simulation of cluster magnetorheological effect plane polishing, *Physics Procedia* 25: 176–184. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.067>
- Shi, X.; Pan, G.; Zhou, Y.; Gu, Z.; Gong, H.; Zou, C. 2014. Characterization of colloidal silica abrasives with difference sizes and their chemical-mechanical polishing performance on 4H-SiC, *Applied Surface Science* 307: 414–427. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.04.048>
- Xu, W.; Lu, X.; Pan, G.; Lei, Y.; Luo, J. 2010. Ultrasonic flexural vibration assisted chemical mechanical polishing for sapphire substrate, *Applied Surface Science* 256: 3936–3940. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.01.053>

EXPERIMENT PLAN FOR RESEARCHES OF POLISHING PROCESS OF OPTICAL DETAILS

I. Švagždytė, M. Jurevičius

Abstract

Descriptions of polishing process, using technologies, materials of optical details are given in this article. High quality requirements are raising for optical details – smoothness of surface, non-existence of effects, form deflections, which are obtainable in polishing process. Results of modelling and experimental data are given in published scientist researches; various cutting rates were used in polishing process. Experiment plan for polishing plane details from optical glass BK7 with different cutting rates is given in this article. Multicriterion optimization in polishing process using for high quality optical details.

Keywords: BK7, experiment plan, factors in polishing process, polishing, surface quality.