Influence of the lead angle of an spherical diamond head on the roughness parameters of corundum ceramics

Wpływ kąta prowadzenia trzpieniowej ściernicy kulistej na chropowatość powierzchni ceramiki korundowej

JAN BUREK ARTUR SZAJNA*

The results of research on grinding of pre-sustained corundum ceramics with the use of a spherical diamond head are **presented. In particular, the influence of the angle** α of grinding wheel axis on selected surface roughness parameters at variable feed speed have been investigated. The distribution of the effective cutting speed in the contact zone of the grinding wheel with the object for the selected grinding depth have been also determined.

KEYWORDS: grinding, corundum ceramics, spherical diamond grinding wheel, grinding wheel axis angle

Przedstawiono wyniki badań szlifowania ceramiki korundowej wstępnie spieczonej za pomocą diamentowej, trzpieniowej ściernicy kulistej. Badano zwłaszcza wpływ kąta α prowadzenia osi ściernicy na wybrane parametry chropowatości powierzchni przy zmiennej prędkości posuwu. Określono również rozkład efektywnej prędkości skrawania w strefie styku ściernicy z przedmiotem dla wybranej głębokości szlifowania. SŁOWA KLUCZOWE: szlifowanie, ceramika korundowa, diamentowa ściernica kulista, kąt prowadzenia osi trzpienia ściernicy

Rozwój techniki, a co za tym idzie – narastające zapotrzebowanie na coraz bardziej wytrzymałe i zaawansowane materiały, spowodował wzrost zainteresowania ceramiką. Takie materiały są szeroko stosowane w medycynie jako elementy układów kostno-stawowych, w implantacji stomatologicznej, a także w przemyśle lotniczym czy samochodowym jako elementy konstrukcyjne silników. Najpopularniejsza jest ceramika korundowa i cyrkonowa [1, 2].

Właściwości tych materiałów, takie jak twardość, odporność na ścieranie, a zarazem wysoka kruchość, determinują metody ich obróbki. W zależności od etapu procesu technologicznego wytwarzania ceramiki wyodrębnia się trzy stany tego materiału, które ograniczają możliwości stosowania różnych metod. O ile w stanie zielonym i częściowo w stanie białym (przy niskim stopniu wstępnego spieczenia) możliwa jest obróbka skrawaniem (np. toczenie, frezowanie), to dla wyższych stopni spieczenia wstępnego i po spiekaniu końcowym konieczne jest stosowanie szlifowania w celu nadania ostatecznego kształtu i odpowiedniej struktury geometrycznej powierzchni kształtowanej części [3].

Wraz ze wzrostem złożoności powierzchni elementu obrabianego coraz częściej wykorzystuje się pięcioosiowe szlifierki, na których osiąga się wysoką prędkość obrotową wrzeciona, wymaganą do szlifowania ściernicami trzpieniowymi kulistymi, umożliwiającymi obróbkę geometrycznie złożonych powierzchni [4].

DOI: https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.11.103

Istotnym problemem podczas szlifowania trzpieniowymi ściernicami kulistymi jest ich orientacja kątowa względem szlifowanej powierzchni. Analogicznie jak w przypadku pięcioosiowego frezowania, wyróżnia się kąt prowadzenia α oraz kąt pochylenia β osi wrzeciona ściernicy, których wartość wpływa na rozkład prędkości skrawania w strefie styku ściernicy i szlifowanej powierzchni (rys. 1).



Fig. 1. Impact of the tool angle on the value of the effective diameter of the grinding wheel contact with the object: *a*) angle of advance, *b*) angle of delay, where: $n_{\rm s}$ – rotational speed of the grinding wheel, $d_{\rm s}$ – grinding wheel diameter, $v_{\rm f}$ – feed speed, $a_{\rm p}$ – grinding depth, $d_{\rm ef_{-}ap}$ – effective diameter of grinding at the machinned surface

Rys. 1. Wpływ kąta prowadzenia narzędzia na wartość efektywnej średnicy styku ściernicy z przedmiotem: *a*) kąt wyprzedzenia, *b*) kąt opóźnienia; gdzie: $n_{\rm s}$ – prędkość obrotowa ściernicy, $d_{\rm s}$ – średnica ściernicy, $v_{\rm f}$ – prędkość posuwu, $a_{\rm p}$ – głębokość szlifowania, $d_{\rm ef_ap}$ – efektywna średnica skrawania przy powierzchni naddatku obróbkowego, $d_{\rm ef_o}$ – efektywna średnica skrawania przy powierzchni obrobionej

^{*} Dr hab. inż. Jan Burek, prof. PRz, jburek@prz.edu.pl, https://orcid.org/0000-0003-2664-5248 – Katedra Technik Wytwarzania i Automatyzacji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska

Mgr inż. Artur Szajna, a.szajna@prz.edu.pl, https://orcid.org/0000-0002-3820-7272 – Katedra Technik Wytwarzania i Automatyzacji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska

Dąży się do takiej orientacji kątowej trzpienia ściernicy względem obrabianej powierzchni, aby zapewniła ona jak największą efektywną prędkość szlifowania [5,6].

Wpływ kąta α (zarówno wyprzedzenia, jak i opóźnienia) na rozkład efektywnej prędkości szlifowania v_{cef} w strefie styku ściernicy kulistej z obrabianą powierzchnią przedstawiono na rys. 2 i 3. Analizę wykonano dla stałej prędkości obrotowej ściernicy $n_s = 25\,000$ obr/min, średnicy nominalnej narzędzia $d_s = 4,4$ mm oraz głębokości szlifowania $a_p = 30 \ \mu$ m.



Fig. 2. Distribution of the effective grinding speed $v_{\rm cef}$ in the contact zone of the grinding wheel and the workpiece for the α angle of delay Rys. 2. Rozkład efektywnej prędkości szlifowania $v_{\rm cef}$ w strefie styku ściernicy i przedmiotu obrabianego dla kąta opóźnienia α



Fig. 3. Distribution of effective grinding speed $v_{\rm cef}$ in the contact zone of the grinding wheel and the workpiece for the leading angle α Rys. 3. Rozkład efektywnej prędkości szlifowania $v_{\rm cef}$ w strefie styku ściernicy i przedmiotu obrabianego dla kąta wyprzedzenia α

Przedstawione wyniki pokazują, że w obu kierunkach ustawienia kąta α (opóźnienie i wyprzedzenie) efektywna prędkość szlifowania przy powierzchni już obrobionej jest identyczna dla obu wariantów kąta prowadzenia. Różnica w rozkładzie prędkości szlifowania uwydatnia się w miejscu styku narzędzia z górną powierzchnią naddatku przeznaczonego do szlifowania. Znacznie większe wartości efektywnej prędkości szlifowania w tym miejscu szlifowania uzyskuje się z zastosowaniem kąta wyprzedzenia. Dla kąta opóźnienia wartości te są mniejsze. Wpływa to na parametry struktury geometrycznej szlifowanej powierzchni.

Stanowisko badawcze i warunki badań

Badania szlifowania ceramiki zrealizowano na pięcioosiowym centrum obróbkowym Ultrasonic 20 linear firmy Sauer (rys. 4), opartym na układzie sterowania Sinumerik Próbki wykonano ze wstępnie spieczonej ceramiki korundowej. Do szlifowania wykorzystano diamentową trzpieniową ściernicę kulistą Dremel 7105 o średnicy nominalnej $d_s = 4,4$ mm. Próbki mocowano w imadle na stole uchylno-obrotowym.



Fig. 4. Test stand: 1 – machine tool, 2 – HSK-A32 holder with Dremel 7105 mounted grinding wheel, 3 – sample Rys. 4. Stanowisko badawcze: 1 – obrabiarka, 2 – oprawka HSK-A32

Rys. 4. Stanowisko badawcze: 1 – obrabiarka, 2 – oprawka HSK-A32 z zamocowaną ściernicą trzpieniową Dremel 7105, 3 – próbka

Warunki badań

Przygotowano sześć prostopadłościennych próbek ze wstępnie spieczonej ceramiki korundowej. Szlifowano powierzchnię czołową, podzieloną na siedem części, w których następowała zmiana prędkości obrotowej ściernicy n_s . Próby przeprowadzono przy dwóch ustawieniach kąta α trzpienia ściernicy – wyprzedzeniu i opóźnieniu. Przyjęto następujące parametry:

- zmienną prędkość obrotową ściernicy n_s (tabl. I),
- stałą głębokość szlifowania a_p = 30 μm,
- stały kąt wyprzedzenia/opóźnienia osi trzpienia ściernicy α = 25°,
- stały kąt pochylenia β = 0°,

• prędkość posuwu v_f = 200 mm/min, 600 mm/min, 1000 mm/min,

stałą szerokość skrawania a_e.

Dla przyjętych prędkości obrotowych ściernicy wyznaczono rozkład efektywnej prędkości szlifowania w strefie styku z powierzchnią obrabianą (tabl. l).

TABLE I. Distribution of effective grinding speed TABLICA I. Rozkład efektywnej prędkości szlifowania

Prędkość	Kąt wypr	zedzenia	Kąt opóźnienia		
[obr/min]	v _c _o [m/s]	$v_c a_p$ [m/s]	v _c _o [m/s]	$v_c a_p$ [m/s]	
7000	0,14	0,4	0,14	0,13	
10000	0,4	0,77	0,4	0,02	
13000	0,77	1,24	0,77	0,29	
16000	1,26	1,81	1,26	0,67	
19000	1,85	2,48	1,85	1,17	
22000	2,53	3,22	2,53	1,78	
25000	3,3	4,03	3,3	2,48	

Gdzie: v_{c} _o – prędkość szlifowania przy powierzchni obrobionej; v_{c} _a_p – prędkość szlifowania przy powierzchni nieobrobionej

Wyniki badań

Pomiary wybranych parametrów chropowatości szlifowanych powierzchni wykonano za pomocą przenośnego chropowatościomierza MarSurf M 300. Uzyskane wartości wybranych parametrów chropowatości powierzchni, w zależności od kąta α prowadzenia ściernicy (wyprzedzenia i opóźnienia) oraz prędkości posuwu i prędkości obrotowej ściernicy, przedstawiono w tabelach II–IV.

Wyniki dowodzą, że istotny wpływ na chropowatość szlifowanej powierzchni ma wybór kierunku kąta α (wyprzedzenie/opóźnienie), ponieważ od niego zależy efektywna średnica narzędzia, a od niej – prędkość szlifowania.

TABLE II. Values of selected roughness parameters obtained at feed rate $\nu_{\rm f}$ = 200 mm/min

TABLICA II. Wartości wybranych parametrów chropowatości uzyskane przy posuwie $v_f = 200 \text{ mm/min}$

Kąt wyprzedzenia Prędkość posuwu <i>v_r</i> = 200 mm/min								
Prędkość obrotowa n _s	Rodzaj parametru [µm]							
[obr/min]	Ra	Rq	Rz	Rpk	Rk	Rvk		
7 000	0,73	1,31	4,98	1,78	1,66	2,16		
10000	0,70	0,96	4,78	0,52	1,77	2,03		
13000	0,43	0,63	3,13	0,29	1,13	1,35		
16000	0,40	0,57	3,24	0,28	0,97	1,21		
19000	0,33	0,50	2,61	0,21	0,72	1,11		
22000	0,31	0,52	2,49	0,26	0,67	1,14		
25000	0,27	0,40	2,41	0,22	0,67	0,85		
Kąt opóźnienia Predkość posuwu y₂ = 200 mm/min								
Prędko	Kąt c ość posu	późnien wu v _f = 2	ia 200 mm/	min				
Prędkość obrotowa n _s	Kąt c ość posu	późnien wu v _f = 2 Ro	ia 200 mm/ dzaj para	min ametru [um]			
Prędko Prędkość obrotowa <i>n_s</i> [obr/min]	Kąt c ość posu <i>Ra</i>	popóźnien wu v _f = 2 Ro <i>Rq</i>	ia 200 mm/ dzaj para <i>Rz</i>	min ametru [<i>Rpk</i>	um] Rk	Rvk		
Prędko Prędkość obrotowa n _s [obr/min] 7 000	Kąt c ość posu <i>Ra</i> 0,67	późnien wu v _f = 2 Ro <i>Rq</i> 0,96	ia 200 mm/ dzaj para <i>Rz</i> 4,66	min ametru [<i>Rpk</i> 0,45	um] <i>Rk</i> 1,56	<i>Rvk</i> 2,30		
Prędko Ść obrotowa n _s [obr/min] 7 000 10 000	Kąt c ość posu <i>Ra</i> 0,67 0,54	późnien wu v _i = 2 Ro <i>Rq</i> 0,96 0,68	ia 200 mm/ dzaj para <i>Rz</i> 4,66 3,29	min ametru [i <i>Rpk</i> 0,45 0,28	um] <i>Rk</i> 1,56 1,52	<i>Rvk</i> 2,30 1,15		
Prędko Prędkość obrotowa n _s [obr/min] 7000 10000 13000	Kąt c ość posu <i>Ra</i> 0,67 0,54 0,52	ppóźnien wu $v_f = 2$ Ro Rq 0,96 0,68 0,71	ia 200 mm/ dzaj para <i>Rz</i> 4,66 3,29 3,84	min ametru [j <i>Rpk</i> 0,45 0,28 0,48	um] <i>Rk</i> 1,56 1,52 1,38	<i>Rvk</i> 2,30 1,15 1,35		
Prędko Prędkość obrotowa n _s [obr/min] 7000 10000 13000 16000	Kąt c ość posu <i>Ra</i> 0,67 0,54 0,52 0,48	późnien wu $v_i = 2$ Ro Rq 0,96 0,68 0,71 0,90	ia 200 mm/ dzaj para 4,66 3,29 3,84 3,55	min ametru [j <i>Rpk</i> 0,45 0,28 0,48 0,27	Jm] <i>Rk</i> 1,56 1,52 1,38 0,88	<i>Rvk</i> 2,30 1,15 1,35 2,20		
Prędkość obrotowa n _s [obr/min] 7 000 10 000 13 000 16 000 19 000	Kąt c ość posu <i>Ra</i> 0,67 0,54 0,52 0,48 0,43	późnien wu $v_i = 2$ Ro Rq 0,96 0,68 0,71 0,90 0,57	ia 200 mm/ dzaj para 4,66 3,29 3,84 3,55 2,89	min ametru [i <i>Rpk</i> 0,45 0,28 0,28 0,48 0,27 0,30	Jm] <i>Rk</i> 1,56 1,52 1,38 0,88 1,34	<i>Rvk</i> 2,30 1,15 1,35 2,20 1,10		
Prędkość obrotowa n _s [obr/min] 7 000 10 000 13 000 16 000 19 000 22 000	Kąt c ość posu Ra 0,67 0,54 0,52 0,48 0,43 0,42	ppóźnien wu v _f = 2 Ro 0,96 0,68 0,71 0,90 0,57 0,55	ia 200 mm/ dzaj para 4,66 3,29 3,84 3,55 2,89 2,98	min ametru [i Rpk 0,45 0,28 0,28 0,28 0,27 0,30 0,30	Jm] Rk 1,56 1,52 1,38 0,88 1,34 1,16	Rvk 2,30 1,15 1,35 2,20 1,10 1,02		

TABLE III. Values of selected roughness parameters obtained at a feed rate of $v_i = 600$ mm/min

TABLICA III. Wartości wybranych parametrów chropowatości uzyskane przy posuwie $v_f = 600$ mm/min

Kąt wyprzedzenia Prędkość posuwu v _r = 600 mm/min								
Prędkość obrotowa n _s	Rodzaj parametru [µm]							
[obr/min]	Ra	Rq	Rz	Rpk	Rk	Rvk		
7000	1,39	1,85	8,05	0,90	3,93	3,91		
10000	1,21	1,56	6,50	0,86	3,76	2,49		
13000	0,86	1,11	4,84	0,71	2,42	1,81		
16000	0,57	0,73	3,45	0,40	1,68	1,13		
19000	0,51	0,67	3,32	0,43	1,27	1,24		
22000	0,48	0,67	3,20	0,40	1,21	1,16		
25000	0,42	0,56	2,69	0,47	1,21	0,96		
Kąt opóźnienia Prędkość posuwu v _r = 600 mm/min								
Prędkość obrotowa n _s	Rodzaj parametru [µm]							
[obr/min]	Ra	Rq	Rz	Rpk	Rk	Rvk		
7000	1,56	1,92	7,33	0,95	5,27	2,39		
10000	1,49	1,83	7,59	1,12	4,99	2,48		
13000	1,18	1,64	6,86	1,00	3,19	3,72		
16000	1,00	1,27	5,57	0,78	3,23	2,15		
19000	0,79	1,02	5,37	1,19	2,62	1,22		
22000	0,70	0,93	4,56	0,42	1,86	1,73		
25000 0,68 0,87 4,10 0,48 1,95 1,37								

TABLE IV. Values of selected roughness parameters obtained at a feed rate of $v_{\rm f}$ = 1000 mm/min

TABLICA IV. Wartości wybranych parametrów chropowatości uzyskane przy posuwie $v_{\rm f}$ = 1000 mm/min

Kąt wyprzedzenia Prędkość posuwu <i>v</i> , = 1000 mm/min							
Prędkość obrotowa ns	Rodzaj parametru [µm]						
[obr/min]	Ra	Rq	Rz	Rpk	Rk	Rvk	
7000	2,01	2,50	10,19	2,87	5,51	3,20	
10 000	1,71	2,12	8,83	2,10	5,59	1,80	
13000	1,16	1,44	6,27	0,68	3,65	1,96	
16000	0,92	1,20	5,96	0,56	2,64	2,18	
19000	0,82	1,09	4,76	0,71	2,45	1,92	
22000	0,77	1,12	5,12	0,51	1,92	2,27	
25000	0,74	0,97	4,75	0,46	2,41	1,92	
Kat anéźniania							

Kąt opóźnienia Prędkość posuwu v_r = 1000 mm/min

Prędkość obrotowa n _s	Rodzaj parametru [µm]						
[obr/min]	Ra	Rq	Rz	Rpk	Rk	Rvk	
7000	2,07	2,80	12,15	1,98	6,46	5,97	
10 000	1,68	2,15	9,04	2,00	4,99	3,28	
13000	1,34	1,71	7,42	0,91	3,83	2,75	
16000	1,16	1,45	6,41	0,68	3,62	1,90	
19000	0,97	1,23	5,25	0,77	2,87	1,61	
22 000	0,91	1,14	5,12	0,61	2,91	1,64	
25000	0,85	1,05	4,44	0,59	2,88	1,19	

Zastosowanie kąta wyprzedzenia umożliwia uzyskanie mniejszych wartości mierzonych parametrów chropowatości niż zastosowanie kąta opóźnienia – zarówno w warunkach szlifowania z różnymi prędkości obrotowej ściernicy. Istotny wpływ na wyniki miała prędkość posuwu. Najlepsze wyniki pod względem jakości uzyskanej powierzchni – zarówno dla kąta wyprzedzenia, jak i opóźnienia – uzyskano dla prędkości obrotowej n_s =25000 obr/min i prędkości posuwowej v_f =200 mm/min.

Podsumowanie

Analizując chropowatość powierzchni uzyskaną podczas prób szlifowania, stwierdzono, że wybór odpowiedniego ustawienia trzpienia ściernicy względem szlifowanej powierzchni ma istotny wpływ na jakość uzyskanej powierzchni. Niższe wartości analizowanych parametrów uzyskano po zastosowaniu kąta wyprzedzenia. Istotny wpływ na uzyskane wartości parametrów chropowatości ma również prędkość szlifowania. Jej wzrost spowodował obniżenie wartości parametrów chropowatości.

LITERATURA

- [1] Burek J., Szajna A., Rydzak T. "Wpływ kąta pochylenia osi trzpieniowej diamentowej ściernicy kulistej na chropowatość powierzchni". *Mechanik.* 8–9 (2018): 706–708, https://doi.org/10.17814/mechanik. 2018.8-9.111.
- [2] Koprowski J., Uhlmann E., Weingaertner W. "Influence of tilt and lead angles on 5-axis grinding with spherical mounted points". Springer, 2018: 11740–11746, https://doi.org/10.1007/s11740-018-0812-5.
- [3] Marinescu I.D. "Handbook of Advanced Ceramics Machining". CRC Press Taylor & Francis Group, 2007: 327–353.
- [4] Schmidt Ch. "Koordinatenschleifen dentalkeramischer Werkstoffe mit kleinen Diamantwerkzeugen". Shaker, Aachen 2008.
- [5] Mikó B., Beňo J. "Effect of the working diameter to the surface quality in free-form surface milling". *Key Engineering Materials*. 581 (online: 7 października 2013): 372–377, https://doi.org/10.4028/www.scientific. net/KEM.581.372.
- [6] Burek J., Żurek P., Żurawski K. "Wpływ kąta pochylenia na chropowatość powierzchni złożonych po obróbce frezem kulistym". *Mechanik* 10 (2016): 1478–1479, https://doi.org/10.17814/mechanik. 2016.10.419.