

# Wpływ kąta pochylenia osi trzpieniowej diamentowej ściernicy kulistej na chropowatość powierzchni

Influence of the tilt angle of an spherical diamond head for roughness parameters

JAN BUREK  
ARTUR SZAJNA  
TOMASZ RYDZAK\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.8-9.111>

W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych szlifowania ceramiki korundowej trzpieniową, diamentową ściernicą kulistą. Określono wpływ kąta pochylenia osi trzpienia ściernicy oraz prędkości wzdłużnej szlifowania na parametry chropowatości  $R_a$  i  $R_z$ . Przeanalizowano również rozkład efektywnej prędkości skrawania.

**SŁOWA KLUCZOWE:** szlifowanie, ceramika korundowa, diamentowa ściernica kulista, kąt pochylenia osi trzpienia ściernicy

*The article presents the results of experimental research for grinding of corundum ceramic with the use of a spherical diamond head. Article shows the influence of tilt angle and feed on roughness parameters. Authors also described influence of tilt angle and thickness of the grinding layer on effective cutting speed.*

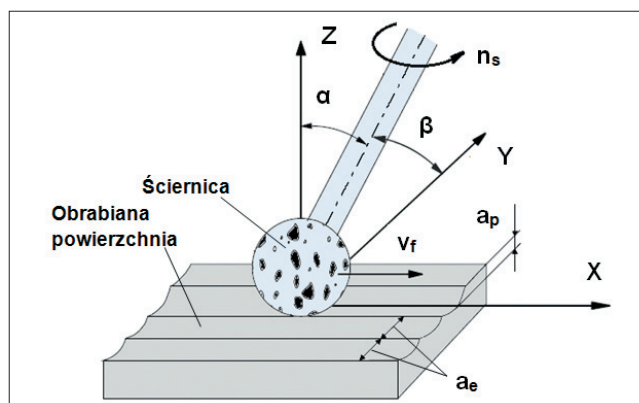
**KEYWORDS:** grinding, corundum ceramics, spherical diamond head, tilt angle of spherical diamond head

W ostatnich latach obserwuje się wyraźny wzrost zapotrzebowania na elementy z ceramiki korundowej o złożonej geometrii. Dotyczy to części stosowanych zarówno w przemyśle narzędziowym, jak i w inżynierii medycznej – na elementy implantów kostnych, stawowych czy zębowych [1–3].

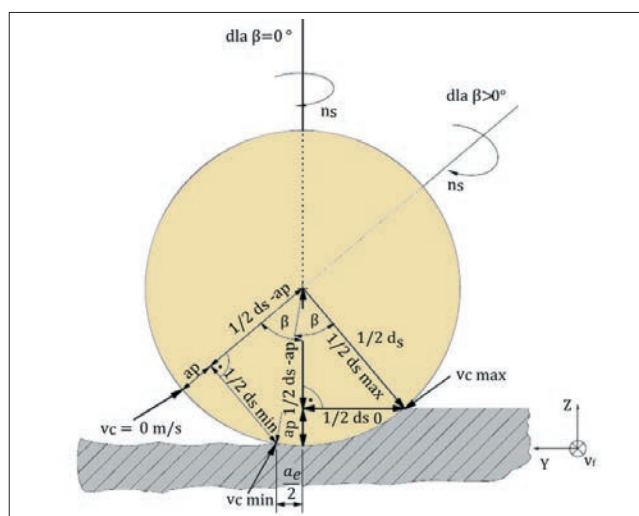
Obecnie stosowane technologie obróbkowe umożliwiają wykonywanie tych złożonych struktur geometrycznych na pięcioosiowych centrach frezarskich z materiałów metalowych i – w bardzo ograniczonym zakresie – z materiałów ceramicznych (w zasadzie dotyczy to obróbki wyłącznie w stanie zielonym, po prasowaniu izostaticznym) [2]. Kształtowanie elementów o złożonej geometrii ze spieczonej ceramiki korundowej i cyrkonowej odbywa się wyłącznie na wieloosiowych centrach obróbkowych w procesie szlifowania diamentowymi, trzpieniowymi ściernicami kulistymi o małych średnicach – rzędu kilku milimetrów [4, 6]. Stosowanie tak małych narzędzi wymaga dużych prędkości obrotowych wrzeciona narzędziowego w celu uzyskania odpowiedniej prędkości szlifowania. Osiągane prędkości szlifowania wynoszą zwykle ok. 5 m/s.

Kinematykę takiego pięcioosiowego procesu szlifowania ściernicami kulistymi przedstawiono na rys. 1. W procesie tym w celu uzyskania jak największej prędkości szlifowania  $v_c$  należy odpowiednio zmieniać kierunek orientacji osi wrzeciona ściernicy. Dotyczy to zarówno kąta pochylenia osi trzpienia ściernicy  $\beta$  (w płaszczyźnie ZY), jak i kąta wyprzedzenia  $\alpha$  (w płaszczyźnie ZX). W zależności od zmiany kąta pochylenia osi trzpienia ściernicy  $\beta$  zmienia się średnica efektywna ściernicy (styku powierzchni roboczej ściernicy z powierzchnią obrabianą) (rys. 2).

\* Dr hab. inż. Jan Burek, prof. PRz (jburek@prz.edu.pl); mgr inż. Artur Szajna (a.szajna@prz.edu.pl); mgr inż. Tomasz Rydzak (t.rydzak@prz.edu.pl) – Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej



Rys. 1. Orientacja kątów pozycjonowania ściernicy ( $a_p$  – głębokość szlifowania,  $a_e$  – szerokość szlifowania,  $\alpha$  – kąt wyprzedzenia,  $\beta$  – kąt pochylenia,  $n_s$  – prędkość obrotowa ściernicy) [1]



Rys. 2. Wpływ kąta pochylenia  $\beta$  osi trzpienia ściernicy na zmianę efektywnej średnicy ściernicy [5]

Wartości minimalnej i maksymalnej efektywnej prędkości skrawania  $v_{c \min}$  oraz  $v_{c \max}$  przy wartości kąta wyprzedzenia  $\alpha = 0^\circ$  i zmiennym kącie pochylenia  $\beta$  przyjmują wartości wynikające z następujących zależności:

$$v_{c \min} = \frac{\pi \cdot d_{s \min} \cdot n_s}{60000} \text{ [m/s]} \quad (1)$$

$$v_{c \max} = \frac{\pi \cdot d_{s \max} \cdot n_s}{60000} \text{ [m/s]} \quad (2)$$

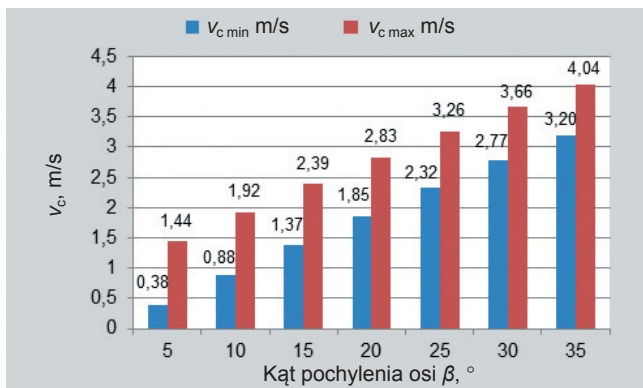
gdzie:  $n_s$  – prędkość obrotowa ściernicy,  $d_{s \min}$  – minimalna efektywna średnica ściernicy,  $d_{s \max}$  – maksymalna efektywna średnica ściernicy.

W związku ze zmianą efektywnej średnicy styku ściernicy zmienia się też efektywna prędkość skrawania  $v_c$ .

Do analizy wpływu kąta pochylenia osi trzpienia ściernicy na wartości efektywnej prędkości skrawania przyjęto następujące parametry:

- średnicę ściernicy  $d_s = 4,4$  mm,
- prędkość obrotową ściernicy  $n_s = 25\ 000$  obr/min,
- głębokość skrawania  $a_p = 30$   $\mu\text{m}$ ,
- szerokość skrawania  $a_e$  uzależnioną od chropowatości teoretycznej, wynoszącej  $R_t = 0,5$   $\mu\text{m}$ , według zależności:

$$R_t = \frac{d_s}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_s}{2}\right)^2 - \left(\frac{a_e}{2}\right)^2} \quad [\mu\text{m}] \quad (3)$$

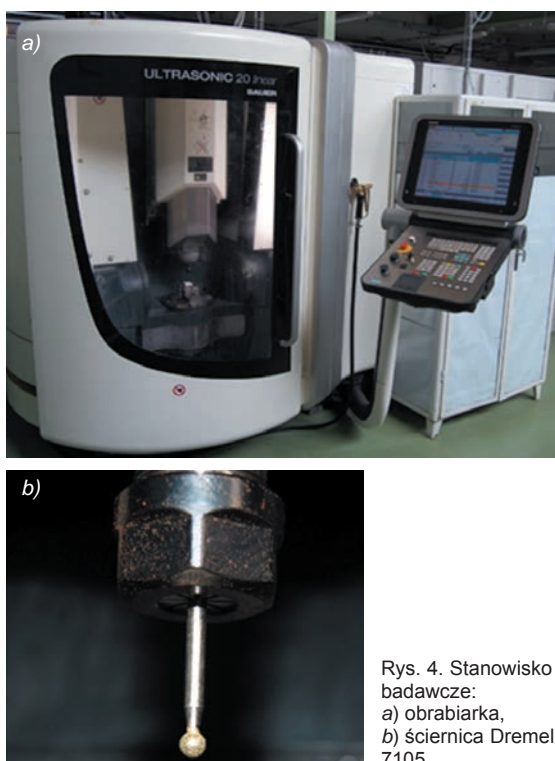


Rys. 3. Wartości efektywnej prędkości skrawania uzyskane dla ściernicy Dremel 7105 przy zmiennej wartości kąta pochylenia osi trzpienia ściernicy  $\beta$

Zauważono, że dla małych wartości kąta  $\beta$  różnica pomiędzy maksymalną a minimalną efektywną prędkością skrawania jest znacząca (rys. 3). Wraz ze wzrostem wartości kąta  $\beta$  różnica ta maleje. Dla kąta  $\beta = 5^\circ$  stosunek  $v_{c\ max}/v_{c\ min}$  jest równy 3,79, a dla  $\beta = 35^\circ$  wynosi 1,26.

### Stanowisko badawcze i warunki badań

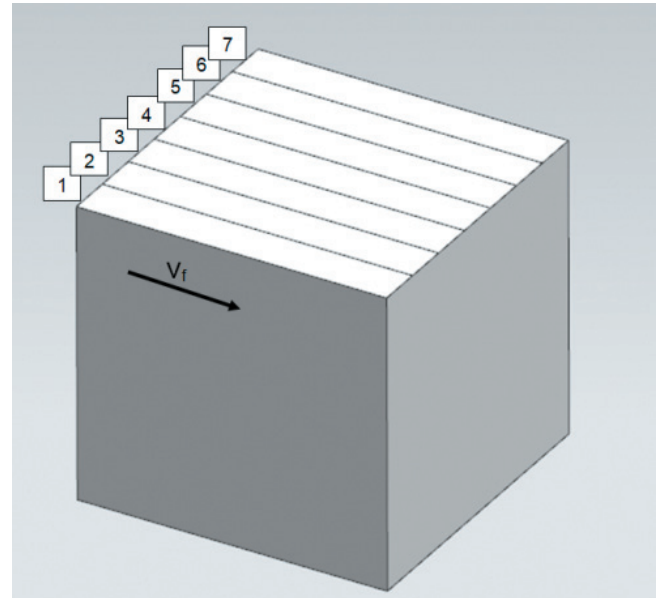
Badanie procesu szlifowania ceramiki korundowej przeprowadzono na pięcioosiowym centrum obróbkowym firmy Sauer (rys. 4) z układem sterowania Sinumerik 840D.



Rys. 4. Stanowisko badawcze:  
a) obrabiarka,  
b) ściernica Dremel 7105

Obróbkę zrealizowano z użyciem powlekaną galwanicznie diamentową, trzpieniową ściernicą kulistą 7105 firmy Dremel. Średnica nominalna ściernicy  $d_s = 4,4$  mm. Próby szlifowania wykonano na wstępnie spieczonej ceramice korundowej. Celem tych badań było określenie wpływu kąta pochylenia  $\beta$  osi trzpienia ściernicy na parametry chropowatości  $R_a$  i  $R_z$  przy różnych wartościach prędkości posuwu  $v_f$ .

Do prób szlifowania przygotowano trzy identyczne prostopadłościenne próbki, które na powierzchni czołowej podzielono na siedem równych części (stref) (rys. 5).



Rys. 5. Podział próbki na strefy szlifowania

Próbki szlifowano z różnymi prędkościami posuwu i ze stałą głębokością szlifowania  $a_p$ . W każdej strefie przyjęto inne wartości kąta pochylenia osi trzpienia ściernicy  $\beta$  (tabl. I).

TABLICA I. Wartości kątów pochylenia  $\beta$  w poszczególnych strefach obróbkowych

Numer strefy	1	2	3	4	5	6	7
Wartość kąta $\beta$ , °	5	10	15	20	25	30	35

W procesie szlifowania zastosowano następujące parametry:

- prędkość obrotową ściernicy  $n_s = 25\ 000$  obr/min,
- głębokość skrawania  $a_p = 30$   $\mu\text{m}$ ,
- kąt pochylenia osi trzpienia ściernicy  $\beta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$  – zależnie od obrabianej strefy (tabl. I),
- kąt wyprzedzenia  $\alpha = 0^\circ$  – dla każdej strefy obróbki,
- posuw  $v_f = 200, 600$  i  $1000$  mm/min,
- szerokość skrawania  $a_e$  – zaprogramowaną tak, aby wartość parametru chropowatości teoretycznej  $R_t$  nie przekraczała  $0,5$   $\mu\text{m}$ .

Podział próbek na strefy obróbki (rys. 5) oraz program obróbkowy zawierający wymienione parametry uzyskano w programie NX 11.0.

### Pomiar chropowatości powierzchni

Pomiar chropowatości powierzchni po szlifowaniu zrealizowano na profilografie MarSurf GD 120 firmy Mahr. Do pomiarów wykorzystano głowicę pomiarową MFW-250:1 (#6851855).

## Wyniki badań

Wartości parametrów  $R_a$  i  $R_z$  chropowatości powierzchni w poszczególnych strefach obróbki, uzyskane dla różnych kątów  $\beta$  oraz prędkości posuwu  $v_f$ , przedstawiono w tabl. II i III oraz na rys. 6 i 7.

TABLICA II. Wartości parametru  $R_a$  chropowatości

$\beta$ , ° \ $v_f$ , mm/min	200	600	1000
5	0,39	0,52	0,7
10	0,35	0,44	0,62
15	0,34	0,36	0,44
20	0,52	0,56	0,58
25	0,33	0,36	0,39
30	0,3	0,3	0,34
35	0,23	0,25	0,26

TABLICA III. Wartości parametru  $R_z$  chropowatości

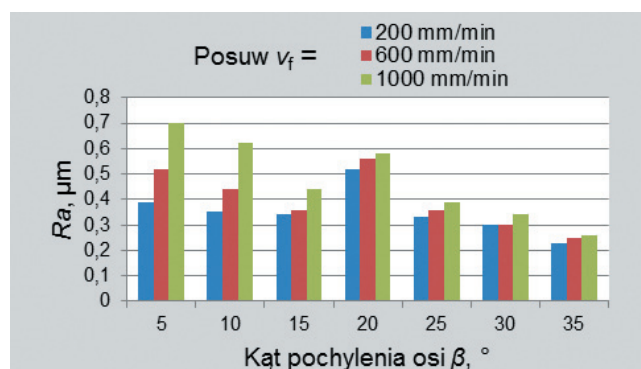
$\beta$ , ° \ $v_f$ , mm/min	200	600	1000
5	2,93	3,59	4,67
10	2,78	3,26	3,86
15	1,98	1,87	2,98
20	3,05	3,66	3,79
25	2,18	2,53	2,63
30	1,84	2,28	2,23
35	1,66	1,8	1,83

Przedstawione wyniki pomiarów parametrów chropowatości  $R_a$  i  $R_z$  powierzchni wskazują, że wartość kąta pochylenia osi  $\beta$  ma istotny wpływ na uzyskiwaną chropowatość powierzchni. Im mniejsza jest wartość tego kąta, tym większa jest chropowatość powierzchni. Wraz ze wzrostem kąta  $\beta$  obserwowano poprawę wartości parametrów  $R_a$  i  $R_z$ .

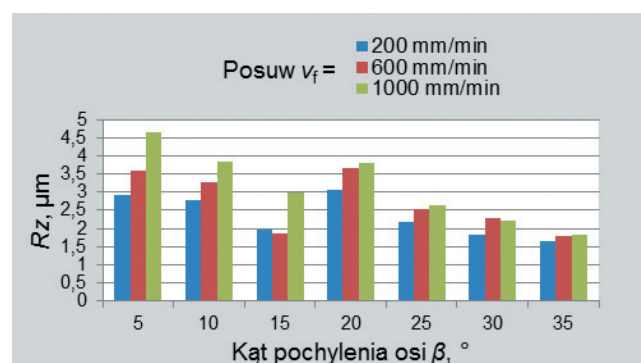
Odpowiednio do wzrostu prędkości posuwu  $v_f$  zwiększały się również wartości parametrów chropowatości  $R_a$  i  $R_z$  (rys. 6 i 7). Charakterystyczny okazał się kąt pochylenia  $\beta = 20^\circ$ . Dla tej wartości nastąpił znaczny wzrost chropowatości  $R_a$  i  $R_z$  (rys. 6 i 7). Najmniejsze wartości parametrów  $R_a$  i  $R_z$  uzyskano przy największej wartości kąta  $\beta$  i najmniejszej wartości posuwu  $v_f$ . Zestawienie dużej wartości kąta  $\beta$  z wysoką prędkością  $v_f$  dało efekty podobne jak omówiona wcześniej kombinacja parametrów.

Zaobserwowano również, że wraz ze wzrostem kąta  $\beta$  zmniejsza się wpływ posuwu na chropowatość obrabianej powierzchni.

Biorąc pod uwagę wszystkie uzyskane wyniki, stwierdzono, że aby uzyskać najlepszą pod względem parametrów  $R_a$  i  $R_z$  chropowatość powierzchni oraz zapewnić odpowiednią wydajność obróbki, należy stosować możliwie największe wartości kąta pochylenia  $\beta$  i towarzyszące im duże wartości prędkości posuwu.



Rys. 6. Wartości parametru  $R_a$  chropowatości powierzchni, uzyskane przy zmiennych wartościach kąta  $\beta$  i różnych wartościach posuwu  $v_f$



Rys. 7. Wartości parametrów chropowatości powierzchni, uzyskane przy zmiennych wartościach kąta  $\beta$  i różnych wartościach posuwu  $v_f$

## Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że chropowatość obrabianej powierzchni w dużym stopniu zależy od efektywnej prędkości skrawania, która z kolei jest istotnie warunkowana zmianami wartości kąta pochylenia osi ściernicy trzpieniowej  $\beta$ . Nie bez znaczenia jest również wartość prędkości posuwu  $v_f$ , która powoduje wyraźną zmianę parametrów chropowatości  $R_a$  i  $R_z$ , zwłaszcza w przypadku małych wartości kąta  $\beta$ . Wraz ze wzrostem kąta  $\beta$  maleje wpływ posuwu na chropowatość obrabianej powierzchni.

Kolejnym etapem badań procesu szlifowania ceramiki korundowej trzpieniową ściernicą kulistą powinna być analiza wpływu kątów sterowania pozycją narzędzia względem obrabianej powierzchni na wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni dla różnych stopni spieczenia materiału. Istotną kwestią jest również weryfikacja zjawisk wywołujących nagły wzrost wartości parametrów  $R_a$  i  $R_z$  dla kąta  $\beta = 20^\circ$ .

## LITERATURA

- Burek J., Szajna A., Lisowicz J., Rydzak T. „Dokładność i chropowatość powierzchni po pięcioosiowym szlifowaniu ściernicą kulistą”. *Mechanik*. 8–9 (2017): s. 763–765.
- Habrat W., Wdowik R., Porzycki J., Świder J. „Określenie granicznych wartości porowatości porzecznej ceramiki korundowej i cyrkonowej w stanie białym dla potrzeb obróbki ściernicami z mikrokrystalicznego korundu spiekane”. *Mechanik*. 8–9 (2014): s. 143–146.
- Koprowski J., Uhlmann E., Weingaertner W. „Influence of tilt and lead angles on 5-axis grinding with spherical mounted points”. *Production Engineering*. 12, 3–4 (2018): s. 449–455.
- Marinescu I.D. „Handbook of Advanced Ceramics Machining”. CRC Press Taylor & Francis Group, 2007, s. 327–353.
- Schmidt Ch. „Koordinationsschleifen dentalkeramischer Werkstoffe mit kleinen Diamantwerkzeugen”. Aachen: Shaker, 2008.
- Uhlmann E., Koprowski S., Weingaertner W., Rolon D.A. „Modelling and simulation of grinding processes with mounted points: Part II of II – Fast modeling method for workpiece surface prediction”. *Production CIRP*. 46 (2016): s. 603–606.