



## Szlifowanie jednostronne z wykorzystaniem ściernic o spoiwie galwanicznym

### Single-side grinding with the use of electroplated tools

MARIUSZ DEJA \*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.348

W referacie przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych szlifowania jednostronnego ceramiki tlenkowej  $Al_2O_3$  z zastosowaniem ściernic o spoiwie galwanicznym z ziarnami diamentowymi D107 i D64. Prototypowe ściernice charakteryzowały się różną wysokością warstwy spoiwa niklowego wpływającą na głębokość i trwałość utwardzenia ziaren ściernych. Ściernice wykonano dla trzech wartości współczynnika  $h$ , wysokości warstwy spoiwa w stosunku do wymiarów ziaren zastosowanych ścierniwi supertwardych. Przedstawiono uzyskane wartości ubytku materiałowego, parametrów chropowatości i falistości oraz temperatury przedmiotów obrabianych i narzędzi.

**SŁOWA KLUCZOWE:** szlifowanie powierzchni płaskich, ściernice o spoiwie galwanicznym, temperatura szlifowania

*The paper presents results of experiments of single side grinding of oxide ceramics  $Al_2O_3$  using electroplated wheels with diamond grains D107 and D64. Prototype wheels were characterized by varying the height of the nickel bond layer affecting the depth and durability of the abrasive grains in the bond. Grinding was performed for three values of the coefficient  $h$ , describing the height of the nickel bond with respect to dimensions of super-hard abrasive particles used in experiments. Values of material removal rate, surface roughness and waviness parameters as well as the temperature rise of workpieces and tools are presented in the paper.*

**KEYWORDS:** flat grinding, electroplated tools, grinding temperature

#### Wprowadzenie

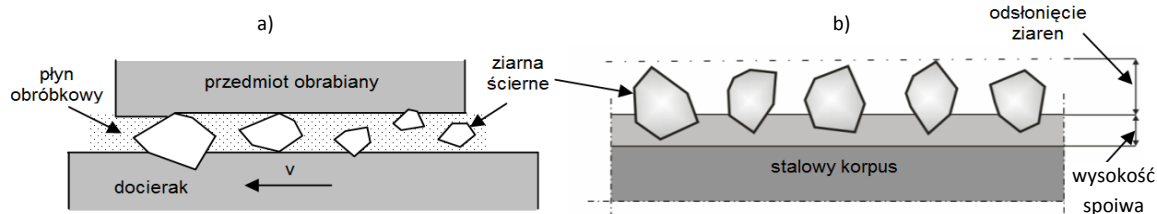
Narzędzia o spoiwie galwanicznym znajdują zastosowanie głównie w obróbce powierzchni kształtowych oraz w przecinaniu materiałów twardych, np. z wykorzystaniem strun trwale zbrojonych ziarnami ściernymi [1]. Wszech-

stronność zastosowania ściernic o spoiwie galwanicznym wynika z możliwości pokrycia warstwą ścierniwa korpusów narzędziowych o dowolnych kształtach. Ściernice te zbudowane są z ziaren ściernych wiązanych warstwą spoiwa (najczęściej niklu) tworzących strukturę z dużymi wolnymi przestrzeniami, umożliwiającymi swobodne odprowadzanie wiórów oraz skuteczne dostarczanie chłodziwa do strefy obróbki [6, 10] - rys. 1.

Zużycie i trwałość ściernic ze ścierniwem diamentowym na spoiwie galwanicznym podczas szlifowania powierzchni płaskich z ceramiki azotkowej  $Si_3N_4$ , badane było w pracy [5]. Eksperymenty szlifowania przeprowadzone zostały dla dwóch prędkości skrawania 85 i 149 m/s. Przeciwnie do oczekiwań, wyższa prędkość nie wpłynęła na chropowatość i na objętościowy współczynnik szlifowania ( $G$ ) oraz na trwałość ściernicy. Obserwacje czynnej powierzchni ściernicy ujawniły zużycie ziaren ściernych przez stępienie wierzchołków i krawędzi. Powodowało to zwiększenie sił i energii szlifowania, aż do praktycznego zakończenia pracy ściernicy. Wyrwanie ziaren i ich kruszenie nie zostało zaobserwowane, jako zjawisko charakterystyczne dla tego procesu.

W pracy [4] autorzy analizowali mechanizm szlifowania i topografię ściernic o spoiwie galwanicznym z ziarnami diamentowymi. Przy zastosowaniu analizy mikroskopowej wyznaczona została średnia wartość liczby czynnych ziaren ściernych na końcu okresu trwałości ściernicy. Wartości te mieściły się w zakresie 48÷63% wszystkich ziaren ściernych, dla których mierzona była początkowa koncentracja powierzchniowa, wynosząca  $C_0 \approx 67 \text{ mm}^{-2}$ . Wraz ze zużyciem ściernicy, zwiększała się liczba czynnych ziaren. W przypadku, gdy ziarna nie zostały usunięte z czynnej powierzchni, ulegały zużyciu, głównie poprzez stępienie. Skutkowało to obniżeniem osiąganych wartości parametrów chropowatości powierzchni obrabianej z wartości początkowej  $Ra = 1,5 \text{ }\mu\text{m}$  do wartości  $Ra = 0,5 \text{ }\mu\text{m}$ .

\* Dr hab. inż. Mariusz Deja, Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, mdeja@pg.gda.pl



Rys. 1. Ziarna luźne stosowane w docieraniu (a) oraz związane spoiwem galwanicznym na czynnej powierzchni ściernicy (b)

Zastosowanie ściernic o spoiwie galwanicznym z ziarnami z regularnego azotku boru do obróbki stalowych powierzchni płaskich i walcowych wewnętrznych, zostało przedstawione w pracach [7, 8]. Analiza zużycia ściernicy wykazała dodatkowo, w porównaniu z poprzednimi badaniami, usuwanie ziaren ścierniczych z czynnej powierzchni ściernicy (CPS) zwłaszcza w początkowej fazie procesu [8]. W kolejnej fazie, w tzw. stanie ustalonym, dominowało pękanie ziaren i ich stępienie. Zużyciu ściernicy towarzyszył analogicznie jak w pracach [4, 5] intensywny wzrost koncentracji powierzchniowej czynnych ziaren wraz ze zmniejszeniem chropowatości powierzchni obrabianej. Koncentracja powierzchniowa aktywnych ziaren ścierniczych okazała się decydującym czynnikiem wpływającym na chropowatość powierzchni przedmiotu obrabianego (PO), w przeciwieństwie do parametrów roboczych nastawianych na obrabiarkę, które nie wpływały znacząco na osiągnięte efekty technologiczne. Wyprowadzona zależność pomiędzy wartością parametru  $Ra$  chropowatości powierzchni obrabianej i koncentracją aktywnych ziaren ścierniczych, miała postać:

$$Ra = 6C^{-0,53} \quad (1)$$

gdzie:  $C$  - koncentracja powierzchniowa aktywnych ziaren ścierniczych.

Wpływ twardości ziaren CBN i wysokość warstwy spoiwa niklowego na zużycie CPS oraz na uzyskiwane wartości parametrów chropowatości powierzchni obrabianej badany był w pracy [9]. Najmniejsze zużycie CPS uzyskano dla najcieńszej warstwy spoiwa, której wysokość odpowiadała 35% nominalnego wymiaru zastosowanego ziarna CBN, wynoszącego  $251 \mu\text{m}$ . Najcieńsza warstwa spoiwa i najtwardsze ziarna skutkowały najmniejszym zużyciem CPS i najniższą energochłonnością szlifowania. W efekcie, dla tych warunków osiągnięto najwyższy objętościowy współczynnik szlifowania  $G$ . Grubsza warstwa spoiwa z głębszym utwardzeniem ziaren, a więc i mniejsza przestrzeń pomiędzy powierzchnią obrabianą, a czynną powierzchnią ściernicy, prawdopodobnie utrudniała usuwanie wiórow i odpowiednie doprowadzenie płynu obróbkowego. Zgodnie z oczekiwaniem, wartości parametrów chropowatości  $Ra$  i  $Rz$  były najwyższe w początkowej fazie procesu i malały do ustalonej wartości.

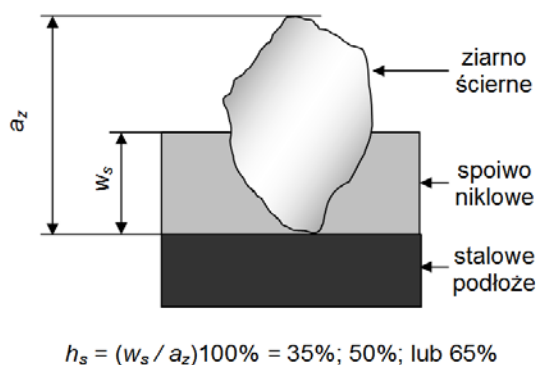
W pracach [2, 3] przedstawiono zastosowanie ściernic o spoiwie galwanicznym w szlifowaniu jednostronnym z kinematyką docierania. Pogarszanie właściwości ściernic o spoiwie galwanicznym następuje w wyniku usuwania ziaren z aktualnie czynnej powierzchni, stępienia ostrzy oraz powstawania narostu. Ściernice inne niż jednowarstwowe również cechuje pogorszenie właściwości ścierniczych w wyniku stępienia ziaren oraz zalepania wolnych przestrzeni międzyziarnowych. Poprawa tych właściwości następuje w procesach wyrównywania i kondycjonowania, które to procesy nie są przeprowadzane dla ściernic o spoiwie galwanicznym. Wartości wydajności szlifowania i parametrów chropowatości powierzchni obrabianych, uzyskane

z zastosowaniem ściernic o spoiwie galwanicznym z ziarnami diamentowymi, wskazały na możliwość praktycznego zastosowania tego typu ściernic w zmodyfikowanym układzie konstrukcyjnym szlifowania jednostronnego [2].

W referacie przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych szlifowania jednostronnego ceramiki tlenkowej  $\text{Al}_2\text{O}_3$  z zastosowaniem ściernic o spoiwie galwanicznym z ziarnami diamentowymi D107 i D64. Prototypowe ściernice charakteryzowały się różną wysokością warstwy spoiwa niklowego wpływającą na głębokość i trwałość utwardzenia ziaren ścierniczych. Przedstawione wyniki szlifowania, dotyczące ubytku materiałowego, parametrów chropowatości i falistości oraz przyrostu temperatury przedmiotów obrabianych i narzędzi potwierdzają możliwość stosowania narzędzi o spoiwie galwanicznym w szlifowaniu jednostronnym.

### Konstrukcje ściernic o spoiwie galwanicznym

Ściernice ze ścierniwem diamentowym (ziarna D107, D64 i D46 o określonym rozkładzie i zakresie wymiarów wg normy ISO 6106-2005) na spoiwie niklowym uzyskanym w procesie galwanizacji zostały wykorzystane do obróbki tlenkowej ceramiki technicznej  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oraz dodatkowo do obróbki węgla spiekanego gatunku G20 [2]. Głównym celem badań było wyznaczenie eksperymentalnych modeli opisujących zmiany wartości wybranych parametrów opisujących strukturę geometryczną powierzchni warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego (SGP WW-PO), liniowego ubytku materiałowego oraz temperatury PO i ściernicy, w funkcji zmiennych niezależnych: czasu szlifowania  $t$  i wysokości warstwy spoiwa galwanicznego  $w_s$ . W badaniach właściwych analizowano m.in. wpływ różnej wysokości  $w_s$  warstwy spoiwa galwanicznego w stosunku do wymiarów  $a_z$  ziaren o numerach D107 i D64 o zakresie wymiarów określonym wg normy ISO 6106-2005. Ściernice wykonano dla trzech wartości procentowego współczynnika wysokości warstwy spoiwa  $h_s = 35\%$ ,  $50\%$  i  $65\%$  - rys. 2.



Rys. 2. Zróżnicowanie wysokości  $w_s$  spoiwa niklowego

Wartości wymiarów ziaren  $a_z$ , dobrano wg wymiaru w  $\mu\text{m}$  oczek górnego sita kontrolnego (wg normy ISO 6106-2005). Prototypowe ściernice (średnica  $D = 380 \text{ mm}$ ) do szlifowania jednostronnego powierzchni płaskich charakteryzowały

się zróżnicowaną wysokością  $w_s$  warstwy spoiwa niklowego, co wpływało na głębokość utwardzenia ziaren diamentowych D107 i D64 w spoiwie. Przykładowy symbol ściernicy D107 65%, oznacza ściernicę ze ścierniwem diamentowym zawierającym ziarna o określonej wielkości dla numeru 107 (wg normy ISO 6106-2005) i o wysokości spoiwa galwanicznego wyznaczonej dla wartości procentowego współczynnika  $h_s = 65\%$ .

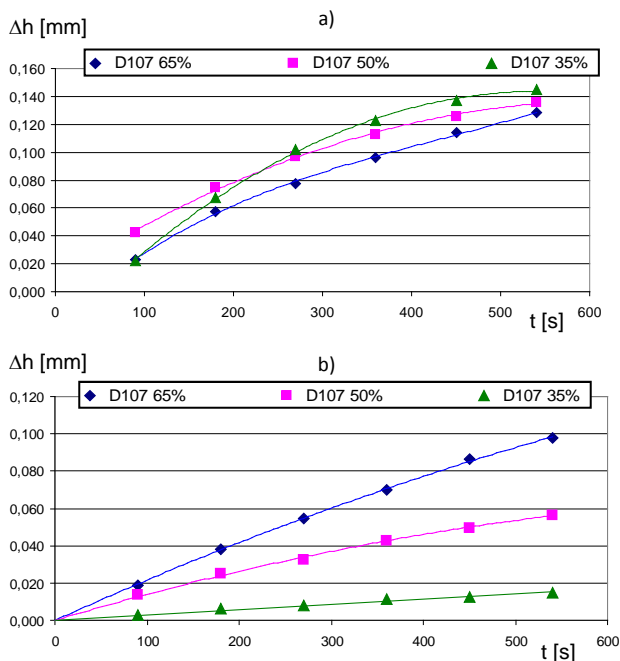
## Wyniki badań eksperymentalnych

We właściwych badaniach eksperymentalnych analizowano wpływ czasu szlifowania  $t$  oraz wysokości warstwy spoiwa galwanicznego  $w_s$ , na osiągnięte efekty technologiczne, przy zastosowaniu parametrów obróbkowych przedstawionych w tab. 1, przyjmując numery ściernic podobnie jak w pracy [2].

Tab. 1. Parametry obróbkowe szlifowania jednostronnego ściernicami o spoiwie galwanicznym z ziarnami diamentowymi (D107 i D64)

Nr i typ ściernicy	Nr testu	Nacisk jednostkowy $p$ [kPa]	Prędkość obrotowa [obr/min]		Parametr kinematyczny $K$	Średnia prędkość szlifowania $v$ [m/s]	Czas testu $\Delta t$ [s]
			ściernica $n_t$	separator $n_s$			
N4 D107 65% N5 D107 50% N6 D107 35% N7 D64 65% N8 D64 50% N9 D64 35%	Początkowy stan CPS - bez zużycia (nowe ściernice)						
	T1÷T6	10	60	121	-1	0,76	90
	Początkowy stan CPS - po 540 s obróbki przy naciskach $p = 10$ kPa						
	T7÷T12	14	60	121	-1	0,76	90
t = 90; 180; 270; 360; 450; 540 [s]; zmienna niezależna $x_1 = t$ dla obu stanów CPS i dla współczynnika wysokości warstwy spoiwa galwanicznego $h_s = 35\%$ ; 50% i 65%							

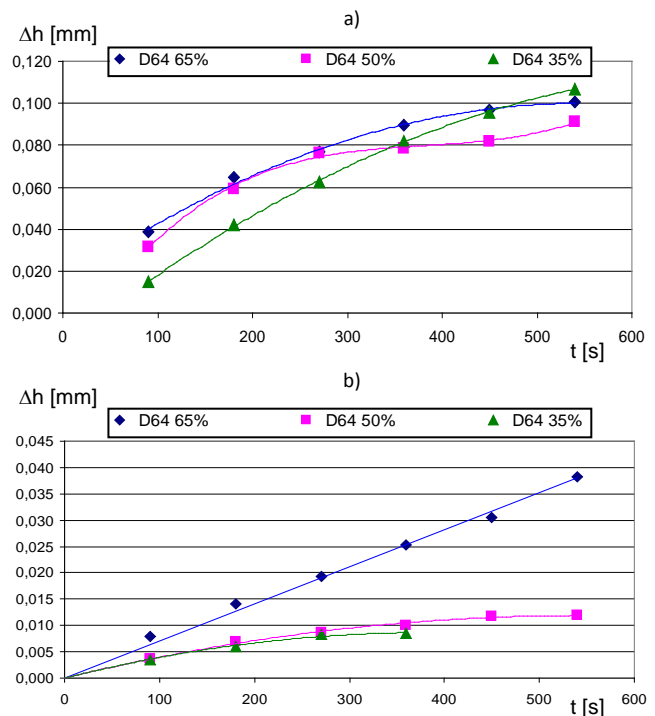
Przebieg obróbki z zastosowaniem ściernic typu N4÷N6 ze ścierniwem diamentowym (ziarna D107), charakteryzował się spadkiem wydajności  $dh$  w kolejnych testach wraz z czasem obróbki, przy małym rozstępie wydajności szlifowania oraz temperatury PO i ściernicy. Podczas szlifowania ściernicami bez zużycia początkowego (testy T1÷T6) uzyskano największy całkowity ubytek liniowy po czasie  $t = 540$  s, przy naj płytszym utwardzeniu ziaren diamentowych D107 i D64 w spoiwie o najmniejszej wysokości (35%) - rys. 3 i rys. 4.



Rys. 3. Liniowy ubytek materiałowy podczas szlifowania ceramiki  $Al_2O_3$  ściernicami o spoiwie galwanicznym z ziarnami diamentowymi (D107): a) bez zużycia, b) ze zużyciem początkowym

Stosunkowo wysoka wydajność szlifowania w testach T1÷T6 malejąca w czasie (rys. 3 a), potwierdza charakter usuwania materiału obrabianego przy większym udziale

zawiesiny ścierniej, pobieranej z CPS po każdym teście do analizy mikroskopowej, z luźnymi ziarnami łatwiej wyrwanymi z cieńszej warstwy spoiwa galwanicznego. Zużycie CPS spowodowało jednak znaczne zmniejszenie wydajności obróbki w kolejnych testach T7÷T12 przy najmniejszym całkowitym ubytku materiałowym osiągniętym dla ściernic z warstwą spoiwa o najmniejszej wysokości - rys. 3 b i rys. 4 b.



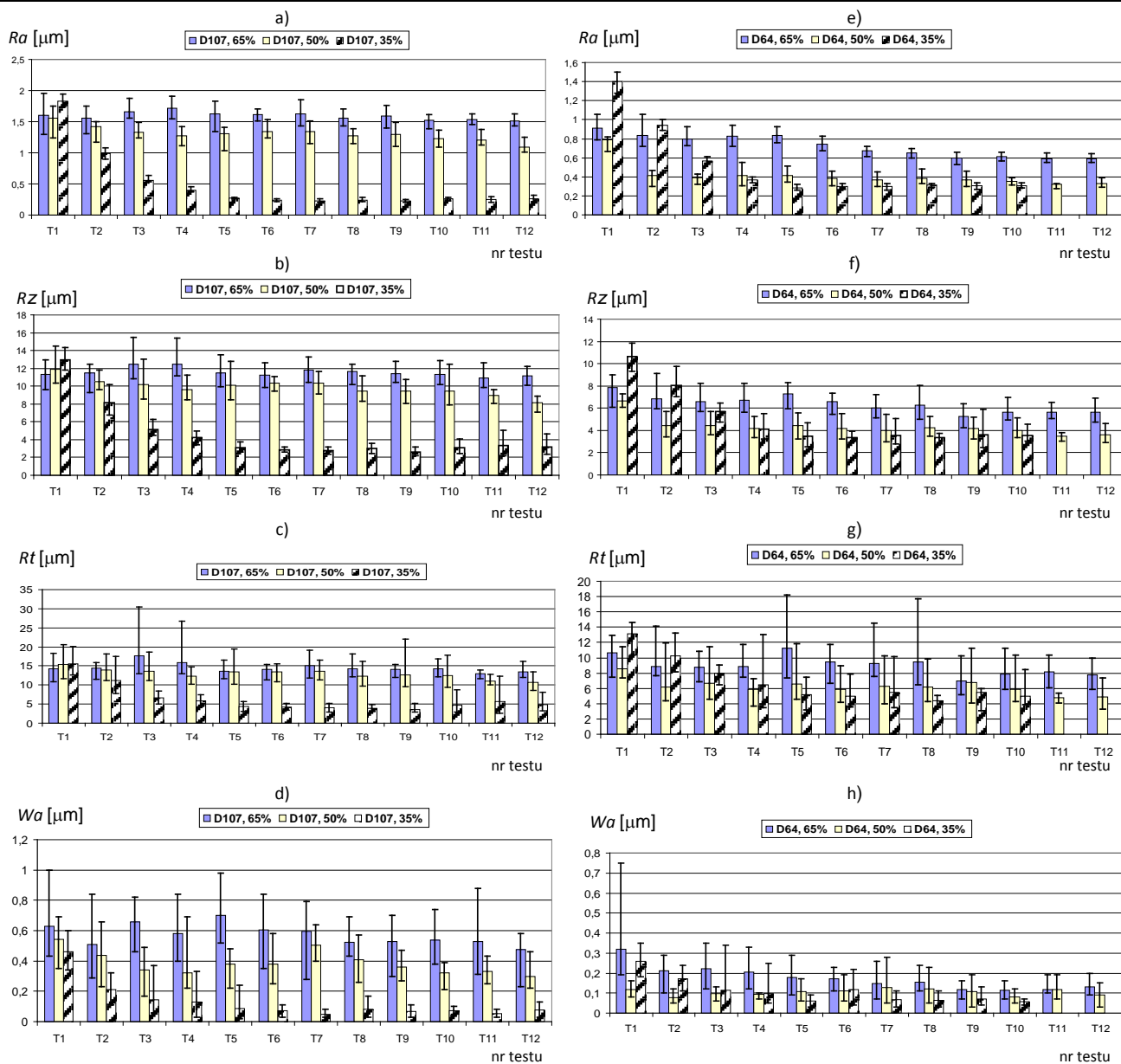
Rys. 4. Liniowy ubytek materiałowy podczas szlifowania ceramiki  $Al_2O_3$  ściernicami o spoiwie galwanicznym z ziarnami diamentowymi (D64): a) bez zużycia, b) ze zużyciem początkowym

Ubytek materiałowy osiągnięty przy zwiększonych naciskach powierzchniowych ( $p = 14$  kPa, testy T7÷T12) wskazuje na wyższą trwałość ściernic z ziarnami utwardzonymi w spoiwie o największej wysokości - rys. 3 b i rys. 4. b. Płyt-

sze utwardzenie ziaren wpłynęło na skrócenie całkowitego czasu pracy ściernicy D64 35% z 18 do 15 minut. Biorąc pod uwagę minimalny ubytek  $\Delta h$  w ostatnim teście T10 ( $t = 270 \div 360$  s), praktyczny czas pracy ściernicy D64 50% wynosił  $T_s = 13,5$  min (obróbka w czasie  $t = 0 \div 540$  s - rys. 4 a, oraz w czasie  $t = 0 \div 270$  s - rys. 4 b).

Na wykresach przedstawionych na rys. 5, widać wyraźny wpływ wysokości warstwy spoiwa na osiągnięte wartości parametrów chropowatości i falistości powierzchni obrabia-

nej. Najwyższe wartości parametrów SGP spośród większości testów uzyskano dla spoiwa o największej wysokości ( $h_s = 65\%$ ), a najniższe (z największym spadkiem od wartości początkowych) dla spoiwa o najmniejszej wysokości ( $h_s = 35\%$ ). Wyjątkiem jest pierwszy test T1, po którym najwyższe wartości parametrów chropowatości osiągnięto dla najbardziej wystających ziaren z uwagi na najmniejszą wysokość warstwy spoiwa ( $h_s = 35\%$ ). Zwiększenie nacisków powierzchniowych w teście T7 spowodowało jedynie niewielki wzrost falistości dla ściernicy N5.



Rys. 5. Wartości wybranych parametrów SGP WW-PO z ceramiki technicznej  $\text{Al}_2\text{O}_3$  po szlifowaniu jednostronnym ściernicą o spoiwie galwanicznym z ziarnami diamentowymi D107: a)  $R_a$ , b)  $R_z$ , c)  $R_t$ , d)  $W_a$  oraz z ziarnami diamentowymi D64: e)  $R_a$ , f)  $R_z$ , g)  $R_t$ , h)  $W_a$

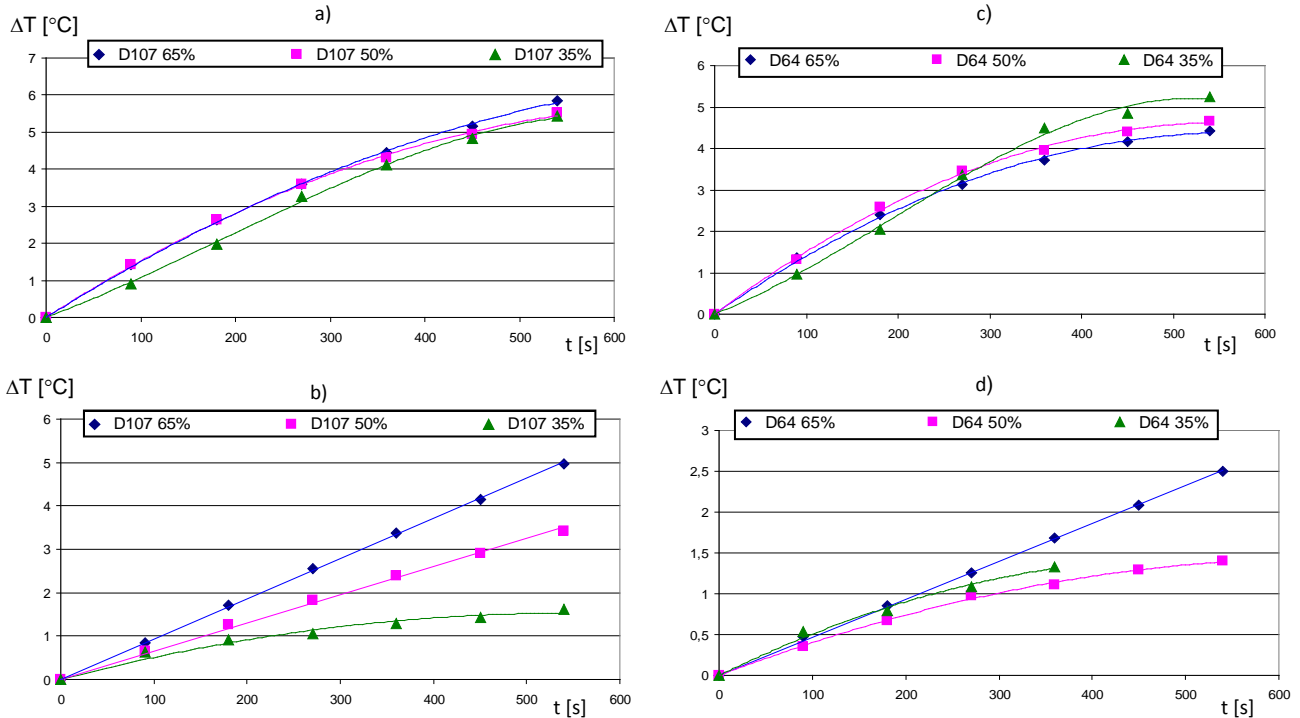
W przeprowadzonych badaniach opracowano rozwiązanie umożliwiające pomiar temperatury w ograniczonej dostępnej strefie obróbkowej szlifowania [2, 3]. Wykorzystano małe, zasilane bateryjnie przyrządy rejestrujące temperaturę, tzw. logery pastylkowe o symbolu DS1922L firmy Dallas Semiconductor [9]. Oprócz programowalnych czujników termoelektrycznych, logery posiadają pamięć wewnętrzzną, w której zapisywana jest historia rejestrowania temperatury (zakres pomiarowy  $-40^\circ\text{C} \div +85^\circ\text{C}$  przy rozdzielczości

0,0625°C). Czujniki temperatury instalowano w przedmiotach obrabianych przy zachowaniu początkowej grubości dna wynoszącej 3 mm, zmniejszającej się w trakcie obróbki o wielkość ubytku materiałowego. Przebieg przyrostu temperatury PO (rys. 6) jest podobny do przebiegu ubytku liniowego (rys. 3 i rys. 4). Większe ziarna D107 pozwoliły uzyskać większą wydajność oraz skutkowały wyższą temperaturą szlifowania. Dla nowych ściernic bez widocznej są niewielkie różnice w osiąganych wartościach temperatury PO przy różnych wysokościach warstwy spoiwa

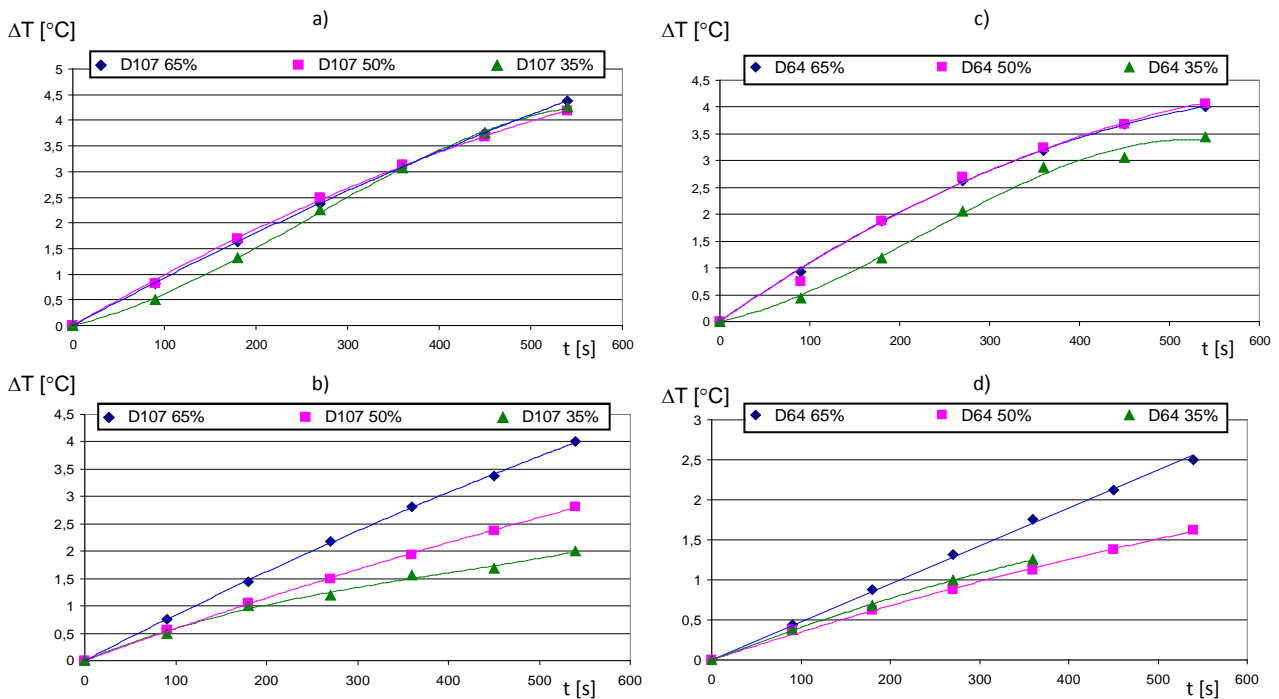


- rys. 6 a i rys. 6 c, zwiększające się w drugim etapie obróbki przy zwiększonych naciskach powierzchniowych do wartości  $p = 14$  kPa - rys. 6 b i rys. 6 d. Podczas szlifowania ściernicami z ziarnami D107 utwardzonymi w spoiwie o największej wysokości (65%) uzyskano największy całkowity ubytek materiałowy  $\Delta h$  po czasie obróbki  $t = 18$  min (rys. 3), oraz najwyższy przyrost temperatury (rys. 6). Tem-

peratura ściernicy (rys. 7) osiągała niższe wartości od temperatury PO (rys. 6) przy podobnych przebiegach wykresów. Uzyskano bardzo zbliżone wartości przyrostu temperatury nowych ściernic dla wysokości spoiwa 65% i 50% w stosunku do obu wielkości ziaren D107 i D64 - rys. 7 a i rys. 7 c, różniące się w drugim etapie obróbki przy zwiększonych naciskach powierzchniowych do wartości  $p = 14$  kPa - rys. 7 b i rys. 7 d.



Rys. 6. Przyrost temperatury PO ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) podczas szlifowania ściernicami o spoiwie galwanicznym z ziarnami diamentowymi bez zużycia początkowego CPS: a) D107, c) D64 oraz ze zużyciem początkowym CPS: b) D107, d) D64



Rys. 7. Przyrost temperatury ściernicy o spoiwie galwanicznym z ziarnami diamentowymi podczas szlifowania PO ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) bez zużycia początkowego CPS: a) D107, c) D64 oraz ze zużyciem początkowym CPS: b) D107, d) D64

## Podsumowanie

Uzyskane wyniki wskazują na większą wydajność szlifowania osiągniętą dla warstwy spoiwa galwanicznego o największej wysokości ( $h_s = 65\%$ ), oraz na niższe wartości parametrów chropowatości i falistości obrabianej powierzchni uzyskane dla warstwy spoiwa o najmniejszej wysokości ( $h_s = 35\%$ ). Utwardzenie ziaren ściernych w warstwie spoiwa o większej wysokości utrudniało ich usuwanie z CPS. Ziarna bardziej wystające ze spoiwa o najmniejszej wysokości były łatwiej wrywane, co sprzyjało ich rozdrobieniu (w wyniku pękania) i tworzeniu zawiesiny ścierniej, podobnej do zawiesiny stosowanej w docieraniu.

Podobnie jak podczas obróbki węgla spiekanego typu G20 [2, 3], temperatura ceramicznych przedmiotów obrabianych ( $Al_2O_3$ ) osiągała niższe wartości niż temperatura ściernic. Cechą charakterystyczną docierania i szlifowania z kinematyką docierania jest dużo niższa temperatura PO (poniżej  $100^\circ C$ ) w porównaniu do szlifowania konwencjonalnego powierzchni płaskich. Zarejestrowane, dzięki opracowanej metodzie pomiaru [2, 3], małe przyrosty temperatury ( $\Delta T < 6^\circ C$ ) przedmiotu szlifowanego jednostronnie nie przekroczyły wartości niebezpiecznych dla uzyskania wymaganej dokładności wymiarowo-kształtowej, jednak wyniki badań uzupełniają dane literaturowe oparte tylko na obliczeniach modelowych lub na pośrednim pomiarze temperatury przez obserwację CPS.

## LITERATURA

1. Ciałkowska B., Wiśniewska M.: Możliwości oceny topografii czynnej powierzchni struny zbrojonej trwale za pomocą nowoczesnych metod mikroskopii. Problemy i tendencje rozwoju obróbki ścierniej. Red. P. Cichosz, Politechnika Wroclawska, Wroclaw, 2012, s. 81-92. ISBN 978-83-917677-6-4.
2. Deja M., Wybrane problemy szlifowania powierzchni płaskich z kinematyką docierania. Monografia nr 143, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2013, 222 s, 2013.
3. Deja M.: Metody pomiaru temperatury przedmiotów i ściernicy w procesie szlifowania jednotarczowego. *Mechanik*, 2014, nr 8-9, s.121-126,
4. Hwang T.W., Evans C.J., Malkin S.: High speed grinding of silicon nitride with electroplated diamond wheels, part 2: wheel topography and grinding mechanisms. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2000, Vol. 122, No. 1, s.42-50.
5. Hwang T.W., Evans C.J., Whitenon E.P., Malkin S.: High speed grinding of silicon nitride with electroplated diamond wheels, part 1: wear and wheel life. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2000, Vol. 122, No. 1, s.32-41.
6. Malkin S., Guo C.: Thermal analysis of grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2007, Vol. 56, Issue 2, s. 760-782.
7. Shi Z., Malkin S.: An investigation of grinding with electroplated cbn wheel. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2003, Vol. 52, Issue 1, s. 267-270.
8. Shi Z., Malkin S.: Wear of electroplated CBN grinding wheels. *Transactions of the ASME - Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2006, Vol. 128, Issue 1s.110-118.
9. Upadhyaya R.P., Fiecoat J.H.: Factors affecting grinding performance with electroplated CBN wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2007, Vol. 56, Issue 1, s. 339-342.
10. Upadhyaya R.P., Malkin S.: Thermal aspects of grinding with electroplated CBN wheels. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, Vol. 126, Issue 1, s. 107-114.

1. Ciałkowska B., Wiśniewska M.: Możliwości oceny topografii czynnej powierzchni struny zbrojonej trwale za pomocą nowoczesnych