

	<b>Organizatorzy:</b>  <b>Politechnika Łódzka</b>  <b>Wydział Mechaniczny</b>	<b>XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKİ ŚCIERNEJ</b> <b>Łódź - Uniejów</b> 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

## Dwuparametrowa ocena zdolności skrawnych ściernic super-twardych ze spoiwem metalowym

The two-parameter cutting ability evaluation of superhard grinding wheels with metal bonded

ANDRZEJ GOŁĄBCZAK  
 MARCIN GOŁĄBCZAK  
 ROBERT ŚWIĘCIK  
 BARTOSZ STAŃCZYK  
 DARIUSZ KACZMAREK \*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.353

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące oceny zdolności skrawnych ściernic supertwardych ze spoiwem metalowym. W procesie szlifowania stopu tytanu Ti6Al4V zastosowano ściernice z regularnego azotku boru (cBN) oraz diamentu syntetycznego (SD). Zdolności skrawne ściernic oceniano na podstawie testu szlifowania wzorca i rejestracji za pomocą urządzenia pomiarowego dwóch wskaźników: wydajności objętościowej szlifowanego wzorca -  $Q_w$  i temperatury szlifowania wzorca -  $\Theta_w$ .

**SŁOWA KLUCZOWE:** ściernice supertwarde, zdolność skrawna, urządzenie pomiarowe, temperatura szlifowania, wydajność objętościowa szlifowania

*In the paper investigation results concerning assessment of abilities of metal-bonded superhard grinding wheels have been presented. During Ti6Al4V titanium alloy grinding process the grinding wheels made of cubic boron nitride (CBN) and synthetic diamond (SD) have been used. Cutting abilities of grinding wheels has been estimated basing on during test recorded of two parameters: volumetric efficiency -  $Q_w$  and temperature of grinding pattern -  $\Theta_w$ .*

**KEYWORDS:** superhard grinding wheels, cutting ability, measuring equipment, grinding temperature

### Wprowadzenie

Szlifowanie ściernicowe jest podstawowym sposobem obróbki wydajnego i dokładnego kształtowania przedmiotów, zwłaszcza z materiałów o dużej twardości i wytrzyma-

łości. Efektywność procesu szlifowania oraz racjonalne wykorzystanie w tym procesie ściernic supertwardych, w decydującym stopniu uwarunkowane są stanem czynnej powierzchni ściernicy (CPS). Stan CPS determinuje bowiem właściwości użytkowe ściernic, a tym samym ich zdolności skrawne, czyli zdolność do usuwania nadmiaru obróbkowego. Postępująca utrata zdolności skrawnych ściernic w procesie szlifowania, wskutek zużycia i zalepiania CPS produktami szlifowania, wpływa na pogorszenie wyników obróbki, w tym dokładności wymiarowo-kształtowej i stanu warstwy wierzchniej (WW) obrabianych przedmiotów [1,10-12,15]. Istnieje więc potrzeba monitorowania i oceny zdolności skrawnych ściernic supertwardych w procesie szlifowania.

W literaturze znanych jest szereg metod i parametrów, które w sposób pośredni lub bezpośredni umożliwiają ocenę zdolności skrawnych ściernic. Parametrami pośredniej oceny zdolności skrawnych ściernic są np.: składowe siły szlifowania, moc szlifowania, energochłonność właściwą, temperaturę szlifowania, drgania, poziom emisji akustycznej [8, 6, 12, 14]. Parametrami bezpośredniej oceny zdolności skrawnych ściernic są natomiast: chropowatość i falistość szlifowanej powierzchni, makrozużycie ściernicy, makro- i mikrogeometria CPS, zalepianie CPS produktami szlifowania oraz wskaźniki szlifowania testerów itp. [2, 4, 9, 11].

Metody szlifowania testerów polegają na przeprowadzeniu testowych prób szlifowania specjalnych próbek- testerów oraz określeniu wskaźników skrawności, np.: właściwej wydajności szlifowania, liniowego ubytku testera, zużycia ściernicy, temperatury szlifowania testera.

W artykule przedstawiono wyniki badań, dotyczące oceny zdolności skrawnych ściernic supertwardych ze spoiwem

\* prof. dr hab. inż. Andrzej Gołąbczak (andrzej.golabczak@p.lodz.pl)  
 dr inż. Marcin Gołąbczak (marcin.golabczak@p.lodz.pl)  
 dr inż. Robert Święcik (robert.swiecik@p.lodz.pl)  
 mgr inż. Bartosz Stańczyk (bartosz.stanczyk@dokt.p.lodz.pl)  
 mgr inż. Dariusz Kaczmarek

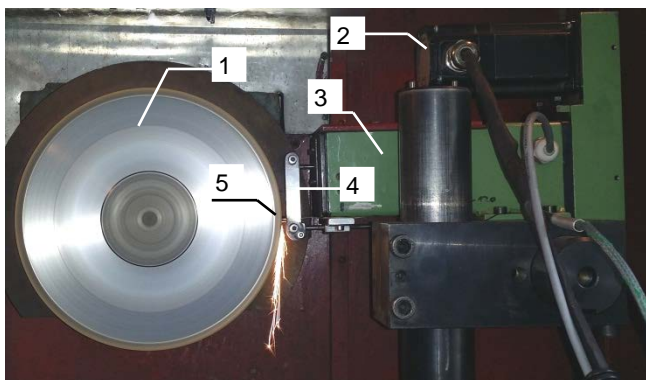
metalowym, dokonanej na podstawie opracowanej w Politechnice Łódzkiej dwuparametrowej metody szlifowania testera [4, 7, 13]. Metoda ta polega na kilkusekundowym teście szlifowania specjalnego testera usytuowanego poza strefą obróbki przedmiotów. Wskaźnikami oceny zdolności skrawnych ściernic są rejestrowane podczas tego testu dwa parametry: ubytek liniowy szlifowanego testera oraz temperatura szlifowania testera. Przydatność tych dwóch parametrów była weryfikowana przez autorów prac [3, 4], do oceny zdolności skrawnych ściernic konwencjonalnych oraz ściernic ze ścierniw supertwardych ze spoiwem ceramicznym.

### Metodyka i urządzenie pomiarowe do oceny zdolności skrawnych ściernic supertwardych

Do oceny zdolności skrawnych ściernic supertwardych ze spoiwem metalowym metodą dwuparametrową, zastosowano specjalny tester- próbkę, wykonaną z pręta ze stopu Ti6Al4V o średnicy  $\varnothing 5$  mm, wewnątrz której umieszczono termoparę typu K. Badania zdolności skrawnych ściernic cBN i SD ze spoiwem metalowym przeprowadzono na szlifierce do płaszczyzn typu ECBT8, wyposażonej w urządzenie pomiarowe (rys. 1). Do określania wskaźników  $\Theta_w$  i  $Q_w$  zastosowano układy kontrolno-pomiarowe parametrów szlifowania oraz komputerowy system rejestracji wyników badań. Schemat układu pomiarowo-sterującego do określania wskaźników  $\Theta_w$  i  $Q_w$  przedstawiono na rysunku 2. W czasie realizacji testu szlifowania próbka dosuwana jest do CPS ze stałą prędkością lub stałą siłą szlifowania oraz dokonywany jest pomiar i rejestracja dwóch wskaźników skrawności:

- $\Theta_w$  [°C] – temperatura szlifowania próbki podczas jej dosuwu do CPS ze stałą prędkością,
- $Q_w$  [mm<sup>3</sup>/s] – wydajność objętościowa szlifowania, podczas dosuwu próbki do CPS ze stałą siłą.

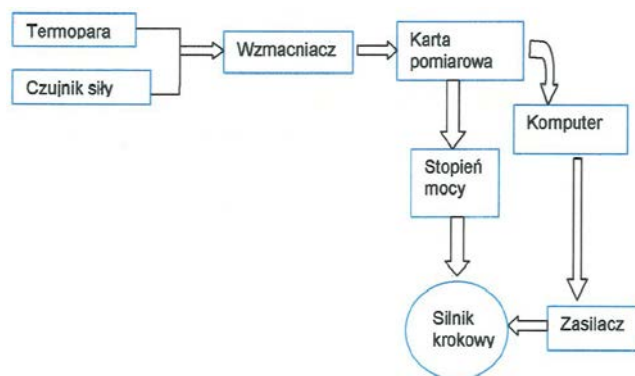
Wymagany podczas realizacji pomiarów wskaźników skrawności  $\Theta_w$  i  $Q_w$  kontrolowany dosuw próbki do ściernicy realizuje układ pomiarowo-sterujący. Szlifowana próbka - 5 zamocowana jest w obejmie zaciskowej - 4, połączonej z mechanizmem dosuwowym - 3. Dosuw próbki do ściernicy - 1, realizowany jest przez silnik krokowy - 2.



Rys. 1. Urządzenie pomiarowe do oceny zdolności skrawnej ściernic: 1 – ściernica supertwarda, 2 – silnik krokowy, 3 – mechanizm dosuwu wzorca wraz z czujnikiem siły, 4 – obejmia zaciskowa, 5 – szlifowany wzorec- próbka z termoparą

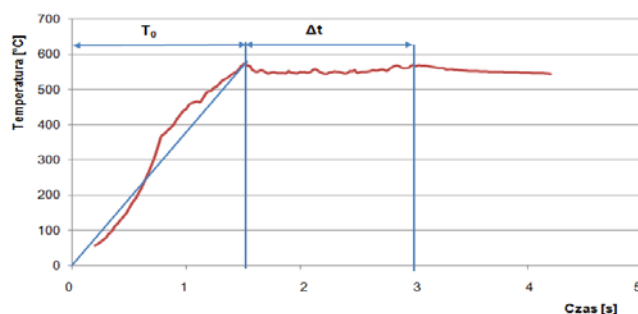
Pierwszy etap testu polegał na szlifowaniu próbki ze stałą prędkością jej dosuwu do ściernicy i rejestracji temperatury szlifowania -  $\Theta_w$ . Stałą prędkość dosuwu próbki do ściernicy zapewniał układ sterujący silnikiem krokowym, wykorzystujący impulsy generowane przez zegar komputera. Drugi etap testu polegał na szlifowaniu próbki ze stałą siłą jej dosuwu do ściernicy oraz rejestrowaniu ubytku liniowego próbki i wyznaczeniu parametru  $Q_w$ . Prędkość dosuwu próbki

w tym etapie szlifowania była wówczas regulowana w torze sprzężenia zwrotnego: czujnik siły, wzmacniacz, komputer i sterownik silnika krokowego.

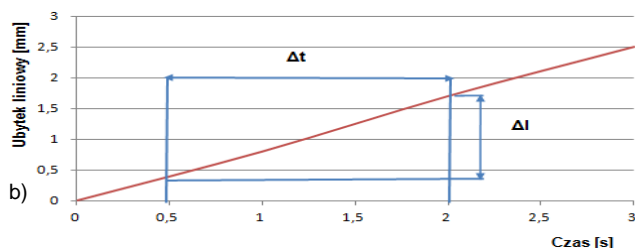
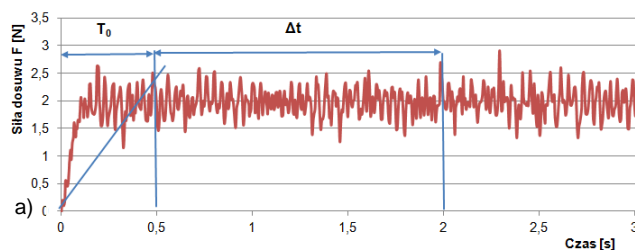


Rys. 2. Schemat układu pomiarowo-sterującego urządzenia do oceny zdolności skrawnych ściernic supertwardych

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy przebieg rejestrowanego sygnału pomiarowego temperatury szlifowania próbki i przedział pomiarowy wskaźnika  $\Theta_w$ , natomiast na rysunku 4 przykładowy przebieg siły docisku próbki do ściernicy oraz przedział pomiarowy wskaźnika  $Q_w$ .



Rys. 3. Przykładowy przebieg temperatury szlifowania próbki, przy prędkości dosuwu  $V_{tw} = 24 \mu\text{m/s}$ , gdzie  $T_0$  – stała czasowa stabilizacji temperatury,  $\Delta t$  – czas rejestracji pomiaru temperatury



Rys. 4. Przykładowe wyniki pomiaru wskaźnika  $Q_w$ : a) stabilizacja zadanej wielkości siły dosuwu  $F=2\text{N}$ , gdzie  $T_0$  – stała czasowa stabilizacji siły szlifowania,  $\Delta t$  – czas rejestracji pomiaru siły, b) zależność ubytku liniowego wzorca  $\Delta l$  od czasu szlifowania  $\Delta t$

Wartość wskaźnika skrawności  $\Theta_w$  określano jako średnią temperaturę szlifowania próbki po ustabilizowaniu się sygnału pomiarowego z termopary, tj. w przedziale czasu  $\Delta t = 1,5$  s (rys. 3). Wartość wskaźnika skrawności  $Q_w$  określano na podstawie pomiaru ubytku liniowego szlifowanej próbki po ustabilizowaniu warunków szlifowania i siły jej docisku do ściernicy w przedziale czasu  $\Delta t = 1,5$  s (rys. 4).

Wskaźnik skrawności  $Q_w$  określano na podstawie zależności (1):

$$Q_w = \frac{V_w}{\Delta t} \left[ \frac{\text{mm}^3}{\text{s}} \right] \quad (1)$$

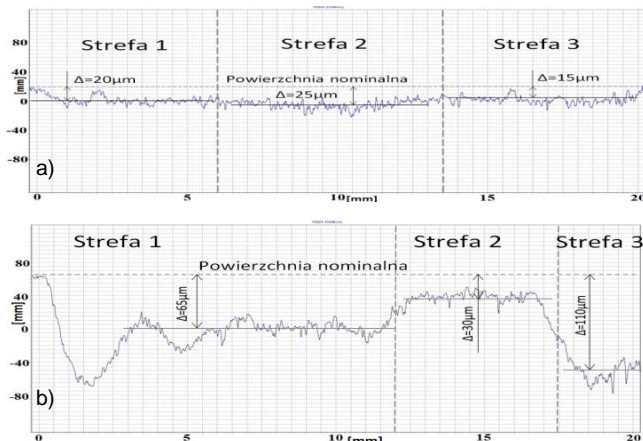
gdzie:  $v_w$  – objętość zeszlifowanego wzorca [ $\text{mm}^3$ ],  
 $\Delta t$  – czas szlifowania [s].

### Ocena zdolności skrawnych ściernic cBN ze spoiwem metalowym

Prezentowane wyniki badań dotyczą porównawczej oceny zdolności skrawnych dwóch ściernic ze ścierniwi z regularnego azotku boru o charakterystyce technicznej CBN 125/100 M75, z których pierwsza była ściernicą „ostrą”, natomiast druga ściernicą „stępioną” w długotrwałych próbach szlifowania elektroerozyjnego AEDG ze stopu tytanu.

Ocenę promieniowego zużycia ściernic dokonano na podstawie profilogramów CPS wzdłuż profilu poprzecznego ściernicy (wzdłuż tworzącej), których przykłady przedstawiono na rysunku 5. Na podstawie profilogramów ustalono następujące strefy zużycia ściernic:

- dla ściernicy cBN 1: 20  $\mu\text{m}$  w strefie 1, 25  $\mu\text{m}$  w strefie 2, 15  $\mu\text{m}$  - w strefie 3 – (rys. 5a),
- dla ściernicy cBN 2: 65  $\mu\text{m}$  w strefie 1, 30  $\mu\text{m}$  w strefie 2, 110  $\mu\text{m}$  - w strefie 3 (rys. 5b).



Rys. 5. Porównanie profilogramów poprzecznych CPS dla ściernic CBN 125/100 M75: a) ściernica „ostra”, b) ściernica „stępiona”

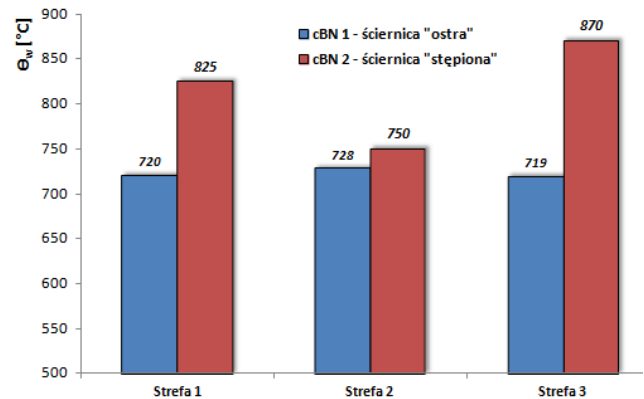
Dla przedstawionych stref zużycia ściernic określono wartości wskaźników  $Q_w$  i  $\Theta_w$ , charakteryzujące zdolności skrawne porównywanych ściernic cBN. Wyniki badań ilustrujące zmiany zdolności skrawnych ściernic cBN w procesie szlifowania przedstawiono na wykresach (rys. 6-7). Wartości wskaźników  $Q_w$  i  $\Theta_w$  podane na wykresach odpowiadają wartościom średnim z pięciu powtórzeń pomiarów.

Ocena zdolności skrawnych ściernic na podstawie analizowanych wskaźników  $\Theta_w$  i  $Q_w$  ujawniła istotne różnice po-

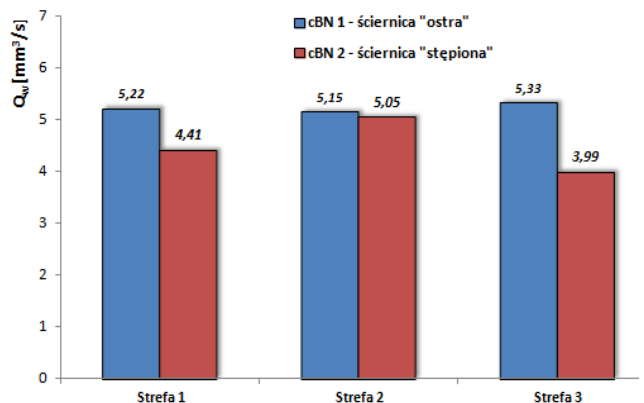
między badanymi ściernicami. Zaobserwowane różnice w wartościach tych wskaźników dotyczą:

a) dla ściernicy cBN 1 „ostrej”

- brak istotnych różnic w wartościach wskaźnika  $\Theta_w$  i  $Q_w$  – różnice w wartościach tych wskaźników nie przekraczały 4%, co świadczy o równomiernym stanie zużycia promieniowego tej ściernicy (rys. 5a),



Rys. 6. Porównanie wskaźnika temperatury szlifowania wzorca  $\Theta_w$  ściernic cBN



Rys. 7. Porównanie wskaźnika wydajności objętościowej  $Q_w$  ściernic cBN

- średnia wartość wskaźnika  $\Theta_w$  wynosiła 722 °C i była niższa, w porównaniu do ściernicy „stępionej” o około 3% w strefie 2, około 12% w strefie 1 i około 17% w strefie 3,
- średnia wartość wskaźnika  $Q_w$  wynosiła 5,23  $\text{mm}^3/\text{s}$  i była wyższa, w porównaniu do ściernicy „stępionej” o około 4% w strefie 2, 15% w strefie 1 i około 24% w strefie 3,

b) dla ściernicy cBN 2 „stępionej”

- największe wartości wskaźnika  $\Theta_w$  zarejestrowano w strefie 3, w której wskaźnik ten był wyższy o około 5% od wskaźnika w strefie 1 i około 14% wyższy od wskaźnika w strefie 2,
- najniższe wartości wskaźnika  $Q_w$  uzyskano również w strefie 3, wskaźnik ten był niższy o około 10% w porównaniu do strefy 1 oraz około 20% w porównaniu do strefy 2.

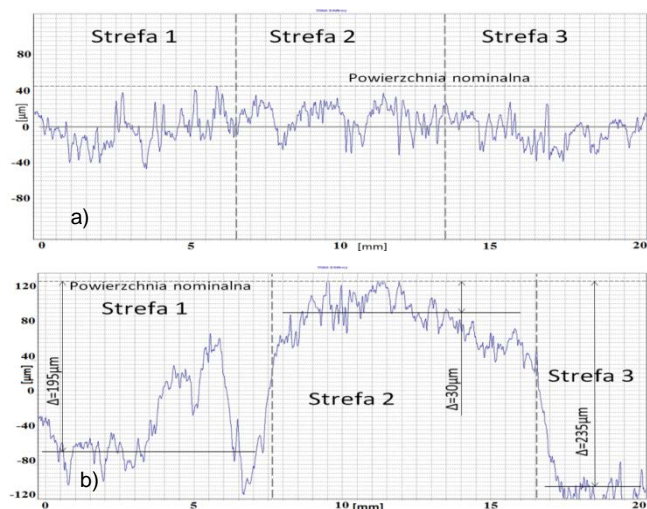
Wykazane różnice w wartościach wskaźników  $\Theta_w$  i  $Q_w$  potwierdzają fakt utraty zdolności skrawnej ściernicy cBN 2 w poszczególnych strefach jej zużycia.



## Ocena zdolności skrawnych ściernic diamentowych ze spoiwem metalowym

Przedstawione wyniki dotyczą porównawczej oceny zdolności skrawnych dwóch ściernic o charakterystyce technicznej SD 125/100 M75, z których pierwsza oznaczona jako SD 1 była użytkowana w krótkotrwałych próbach szlifowania i traktowana jako „ostra”, natomiast druga oznaczona jako SD 2 była ściernicą „stępioną” w długotrwałych próbach elektroerozyjnego szlifowania AEDG węglików spiekanych.

Określono promieniowe zużycie tych ściernic na podstawie profilogramów CPS wzdłuż profilu poprzecznego, które przedstawiono na rysunku 8. Profilogram dla ściernicy „ostrej” (rys. 8a) charakteryzuje się prostoliniowym zarysem CPS. Z kolei, profilogram dla ściernicy „stępionej” ujawnia trzy strefy zużycia promieniowego (rys. 8b), które wynoszą odpowiednio: 195  $\mu\text{m}$  w strefie 1, 30  $\mu\text{m}$  w strefie 2, 235  $\mu\text{m}$  - w strefie 3.



Rys. 8. Porównanie profilogramów poprzecznych CPS ściernic SD 125/100 M75: a) ściernicy „ostrej”, b) ściernicy „stępionej”

Podobnie jak w przypadku ściernic cBN, dla przedstawionych stref zużycia ściernic określono zdolności skrawne ściernic SD. Rejestrowano w procesie szlifowania wskaźniki  $\Theta_w$  i  $Q_w$ . Wyniki badań ilustrujące zmiany zdolności skrawnych ściernic SD w procesie szlifowania stopu tytanu przedstawiono na rysunkach 9-10.

Ocena zdolności skrawnych ściernic SD na podstawie wskaźników  $\Theta_w$  i  $Q_w$  ujawniła szereg różnic pomiędzy badanymi ściernicami. Wśród nich wyróżnić można:

### a) dla ściernicy SD 1 „ostrej”

- brak istotnych różnic w wartościach wskaźnika  $\Theta_w$   $Q_w$  – różnice w wartościach tych wskaźników mieściły się w zakresie 2-5%,
- średnia wartość wskaźnika  $\Theta_w$  wynosiła 613  $^{\circ}\text{C}$  i była niższa, w porównaniu do ściernicy „stępionej” o około 2% w strefie 2, i około 15% w strefie 3,
- średnia wartość wskaźnika  $Q_w$  wynosiła 5,71  $\text{mm}^3/\text{s}$  i była wyższa, w porównaniu do ściernicy „stępionej” o około 7% w strefie 2 i około 24% w strefie 3,

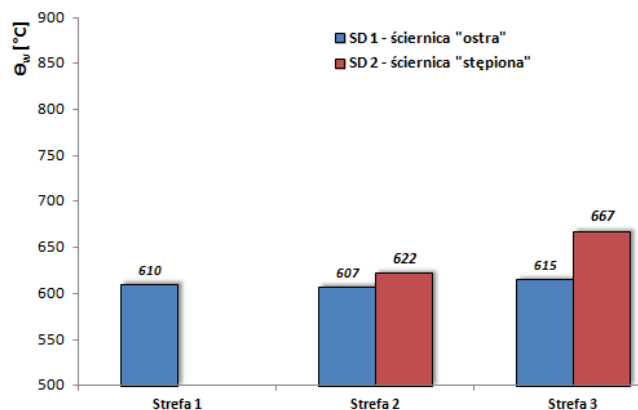
### b) dla ściernicy SD 2 „stępionej”

- największą wartość wskaźnika  $\Theta_w$  zarejestrowano w strefie 3, który był wyższy o około 7% w porównaniu do strefy 2. Nie zarejestrowano natomiast zmian tego wskaźnika w strefie 1. Wynika to z faktu nierówno-

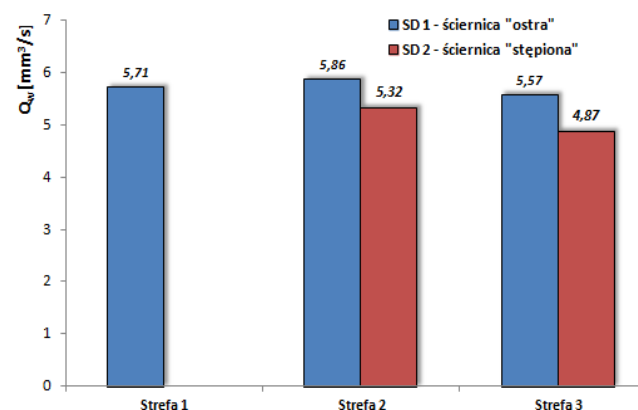
miernego zużycia promieniowego CPS w tej strefie (rys. 8b). Zrezygnowano zatem z prób analizy właściwości skrawnych dla tej strefy.

- najniższą wartość wskaźnika  $Q_w$  uzyskano w strefie 3, gdzie wartość tego wskaźnika była niższa o około 9% w porównaniu do strefy 2.

Wykazane tu różnice w wartościach wskaźników  $\Theta_w$  i  $Q_w$  potwierdzają, podobnie jak w przypadku ściernic cBN, utratę zdolności skrawnych ściernicy diamentowej SD 2 w strefie, największego zużycia promieniowego CPS.



Rys. 9. Porównanie wskaźnika wydajności objętościowej  $Q_w$  ściernic SD



Rys. 10. Porównanie wskaźnika wydajności objętościowej  $Q_w$  ściernic SD

Wyniki badań potwierdziły także wpływ rodzaju ściernicy na uzyskiwane wartości wskaźnika  $\Theta_w$ . Stwierdzono bowiem niższe wartości tego wskaźnika dla procesów szlifowania stopów tytanu, realizowanych ściernicami ze ścierniwa diamentowego (SD). Potwierdza to wcześniejsze spostrzeżenia autorów, prezentowane w pracy [5], o uzyskiwanych niższych temperaturach WW szlifowanych stopów tytanu w procesie szlifowania konwencjonalnego oraz AEDG, z zastosowaniem ściernic diamentowych. Diament jako materiał ścierny, charakteryzuje się wyższą przewodnością cieplną, w porównaniu do regularnego azotku boru (cBN). Ciepło zostaje zatem szybko odprowadzone ze strefy styku ściernicy z przedmiotem obrabianym, stąd maksymalne temperatury szlifowania, a tym samym wartości wskaźników  $\Theta_w$  uzyskiwane w porównywanych tu procesach, są niższe w porównaniu do uzyskiwanych z zastosowaniem ściernic cBN.

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły przydatność zastosowanej dwuparametrowej metody oceny zdolności skrawnych ściernic supertwardych ze spoiwem metalowym w procesie szlifowania. Parametry tej metody wykazują bowiem wrażliwość na zmiany właściwości skrawnych ściernicy, w zróżnicowanych strefach jej zużycia. Wyniki pomiarów potwierdziły, że wraz ze wzrostem zużycia promieniowego CPS wzrasta temperatura szlifowania WW i maleje jednocześnie wydajność objętościowa szlifowanego materiału. Świadczy to o utracie zdolności skrawnych ściernic.

Badania ujawniły również, że zastosowanie ściernic ze ścierniwem diamentowym SD w procesach szlifowania materiałów trudnoobrabialnych, wpływa na uzyskiwanie niższych temperatur szlifowania.

## LITERATURA

1. Bailey M. W., Juchem H.O., The advantages of cBN grinding: Low cutting forces and improved workpiece integrity, IDR, 58/3/1998, 83-89.
2. Beyer P., High-production grinding with vitrified bond superabrasives – HPB technology for vitrified bond CBN wheels. Industrial Diamond Review, 65 (2005)1, 46 ÷ 48.
3. Gołąbczak A., Koziarski T., Analysis of functional properties of CBN grinding wheels. Mechanics and Mechanical Engineering. 4 (2000)1 pp. 117 – 120.
4. Gołąbczak A., Koziarski T., New possibilities of estimation of cutting ability of superhard grinding wheels. Advances in Manufacturing Science and Technology. vol. 26, nr 2, 2002, 77-85.
5. Gołąbczak A., Święcik R., Gołąbczak M., Stańczyk B., Badania porównawcze temperatury warstwy wierzchniej w procesie elektroerozyjnego szlifowania (AEDG) materiałów trudnoobrabialnych, Mechanik, 8-9, 2014, 134-137/723.
6. Karpuschewski B., Wehmeier M., Inasaki I., Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensor. Annals of the CIRP, 49(1), 2000, 235-240.
7. Koziarski A., Czynna powierzchnia ściernicy, metody badań makro i mikrogeometrii, monografia, Politechnika Łódzka, 1996.
8. Krzos J., Wskaźniki zdolności skrawnej ściernicy, Obróbka metalu, 2, 2013, 48-53.
9. Lipiński D., Kacalak W., Tandecka K., Zastosowanie systemu skanowania przestrzennego do oceny zużycia narzędzi ściernych, PAK vol. 59, nr 11, 2013, 1227-1230.
10. Malkin, S.; Gou, C., Grinding Technology – Theory and Applications of machining with Abrasives. Industrial Press, New York, 2008.
11. Meister T.A., Highly productive grinding with innovative tool technology. Industrial Diamond Review, 67(2007)1, 23 ÷ 24.
12. Oczó K.E., Habrat W., Ściernice supertwarde - właściwości, zastosowanie i perspektywy rozwoju. Mechanik, 2007, 80(8/9), 595-607.
13. Rutkiewicz T., Zastosowanie pomiaru zdolności skrawnej ściernicy, wykonanego poza strefa obróbki przedmiotu, do oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy. Praca doktorska. PŁ 1999.
14. Sutowski P., Oszacowanie stopnia zużycia ściernicy z wykorzystaniem sygnału emisji akustycznej i teorii zbioru rozmytych. ATiMA, vol. 30, nr 4, 2010, 47-56.
15. Wegener K., Hoffmeister H.-W., Karpuschewski B., Kuster F., Hahmann W.-C., Rabiey M., Conditioning and monitoring of grinding wheels. CIRP Annals – Manufacturing Technology 60 (2011), s. 757-777.