

# Elektroerozyjne obciążanie elektrodą stacjonarną ściernic ze ścierniwem diamentowym o spoiwie metalowym

MARCIN GOŁĄBCZAK, ANDRZEJ GOŁĄBCZAK, DARIUSZ KACZMAREK\*

Przedstawiono stanowisko badawcze do elektroerozyjnego obciążania elektrodą stacjonarną ściernic diamentowych ze spoiwem metalowym oraz wybrane wyniki badań porównawczych dotyczących oceny zdolności skrawnych ściernic po długotrwałych testach szlifowania i po obciążaniu elektroerozyjnym. Zdolności skrawne ściernic diamentowych oceniano na podstawie dwuparametrowej metody szlifowania wzorca zewnętrznego (termopary), którą określano temperaturę szlifowanego wzorca zewnętrznego oraz względną wydajność szlifowania wzorca. Przeprowadzone badania umożliwiły sprawdzenie przydatności elektroerozyjnego obciążania elektrodą stacjonarną do kształtowania zdolności skrawnych ściernic diamentowych ze spoiwem metalowym. Wyniki badań uzasadniają kontynuowanie prac nad doskonaleniem procesu tego sposobu obciążania ściernic, w szczególności nad ustaleniem racjonalnych warunków obciążania oraz adaptacji tego sposobu w warunkach przemysłowych.

## WPROWADZENIE

Szlifowanie ściernicami pozostaje nadal kluczowym sposobem wydajnego i dokładnego kształtowania przedmiotów, zwłaszcza wykonanych z trudnoobrabialnych materiałów konstrukcyjnych o dużej twardości i wytrzymałości, np.: stopów tytanu, magnezu, superstopów na bazie niklu i kobaltu, itd. [1, 2, 6, 9]. Efektywność procesu szlifowania oraz racjonalne wykorzystanie w tym procesie ściernic super-twardych spojonych spoiwem metalowym uwarunkowana jest stanem czynnej powierzchni ściernicy (CPS), który warunkuje ich zdolności skrawne [3, 5, 10]. Ściernice super-twarde, jakkolwiek charakteryzują się bardzo długim okresem trwałości i dużymi zdolnościami skrawnymi, to jednak w okresie szlifowania ulegają zużyciu i tracą swoje właściwości skrawne. Wpływa to na pogorszenie wyników szlifowania, zwłaszcza wydajności szlifowania, chropowatości powierzchni, dokładności wymiarowo-kształtowej oraz stanu warstwy wierzchniej (WW) szlifowanych przedmiotów. Przywracanie utraconych w procesie szlifowania zdolności skrawnych ściernic supertwardych zapewniają głównie erozyjne metody obciążania, a zwłaszcza metody obciążania elektroerozyjnego. Polegają one na wykorzystaniu energii krótkotrwałych

wyładowań iskrowych, zachodzących w przestrzeni między-elektrodowej pomiędzy metalowym spoiwem ściernicy i elektrodą stacjonarną (erodą) [4, 7, 8, 11].

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań porównawczych, dotyczących oceny zdolności skrawnych ściernic diamentowych ze spoiwem metalowym po długotrwałych testach szlifowania oraz po obciążaniu elektroerozyjnym elektrodą stacjonarną. Zdolności skrawne ściernic diamentowych oceniano dwuparametrową metodą szlifowania wzorca zewnętrznego (termopary), w której określano temperaturę szlifowanego wzorca zewnętrznego oraz objętościową wydajność szlifowania wzorca [3, 5].

## STANOWISKO BADAWCZE I METODYKA BADAŃ

Podstawowym elementem stanowiska badawczego jest szlifierka elektroerozyjna do płaszczyzn ECBT8 (rys. 1), wyposażona w generator impulsów wyładowań iskrowych typu Marcosta GMP75. W jego strukturze są także systemy kontrolno-pomiarowe procesu elektroerozyjnego szlifowania i obciążania ściernic supertwardych oraz zespół do elektroerozyjnego obciążania ściernic supertwardych elektrodą stacjonarną.

W realizowanych badaniach wykorzystywano również profilometr PGM-1C IOS Kraków do pomiarów zużycia ściernic, mikroskop skaningowy Hitachi S-3500 do rejestracji obrazów CPS i określenia liczności ziaren diamentowych na CPS oraz urządzenie do dwuparametrowej oceny skrawności ściernic metodą szlifowania wzorca zewnętrznego.

Schemat układu do elektroerozyjnego obciążania elektrodą stacjonarną ściernic supertwardych oraz widok ogólny strefy

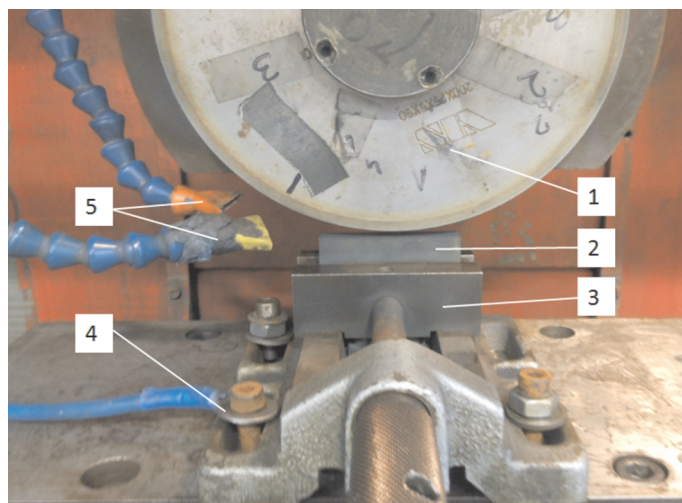
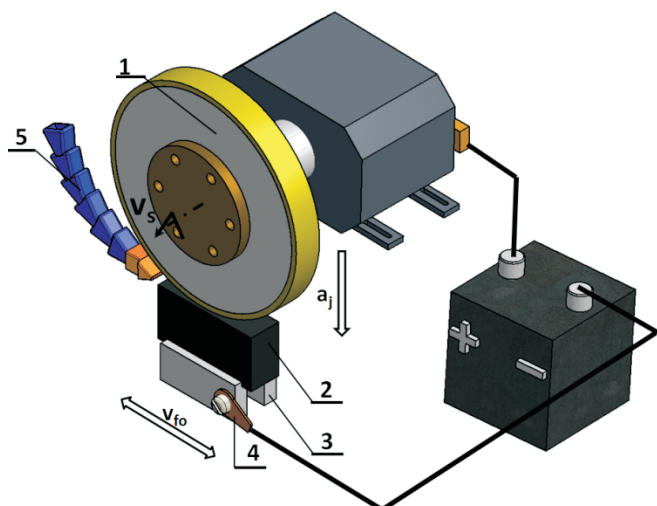
\* Dr hab. inż. Marcin Gołąbczak, prof. PŁ, dr inż. Dariusz Kaczmarek, Politechnika Łódzka, Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn, Zakład Technologii Maszyn, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź, e-mail: marcin.golabczak@p.lodz.pl, prof. dr hab. inż. Andrzej Gołąbczak, Państwowa Uczelnia Zawodowa we Włocławku, Instytut Nauk Społecznych i Technicznych, Zakład Inżynierii Zarządzania, ul. 3 Maja, 87-800 Włocławek, e-mail: andrzej.golabczak@puz.wloclawek.pl



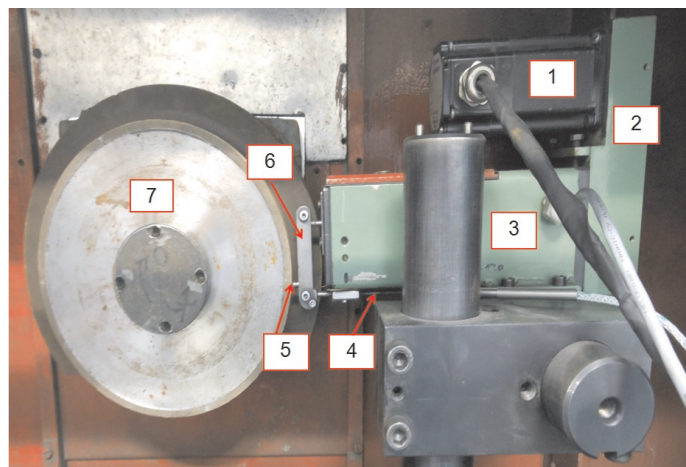
Rys. 1. Widok stanowiska badawczego elektroerozyjnego szlifowania płaszczyzn i obciążania ściernicy: 1 – generator impulsów elektrycznych, 2 – doprowadzenie napięcia elektrycznego do elektrody roboczej, 3 – dysza cieczy dielektrycznej, 4 – ściernica, 5 – elektroda robocza, 6 – terminal karty pomiarowej, 7 – komputer PC, 8 – szlifierka ECBT8

obciążania ściernicy na szlifierce ECBT8 przedstawiono na rysunku 2.

Układ obciążania ściernic supertwardych elektrodą stacjonarną jest stosunkowo najprostszy w realizacji, wymaga jednak odizolowania ściernicy i wrzeciona szlifierki od korpusu, w celu doprowadzenia napięcia z generatora impulsów prądowych do ściernicy za pomocą komutatora. W realizowanych badaniach zastosowano elektrodę roboczą w formie prostokątnego bloku grafitowego (E28S) o wymiarach 120×25×35 mm, zamocowaną na stole szlifierki w szczękach imadła, do którego doprowadzono ujemny biegun napięcia z generatora wyładowań elektroiskrowych. W czasie procesu elektroerozyjnego obciążania do ściernicy doprowadzono dyszami dielektryk do szczeliny roboczej, utworzonej pomiędzy wirującą ściernicą a elektrodą stacjonarną, natomiast stół szlifierki wraz elektrodą wykonywał ruch posuwisto-zwrotny z prędkością  $v_r$ . Po każdym z nawrotów stołu dosuwano ściernicę do elektrody zachowując szczelinę roboczą około 0,05 mm.



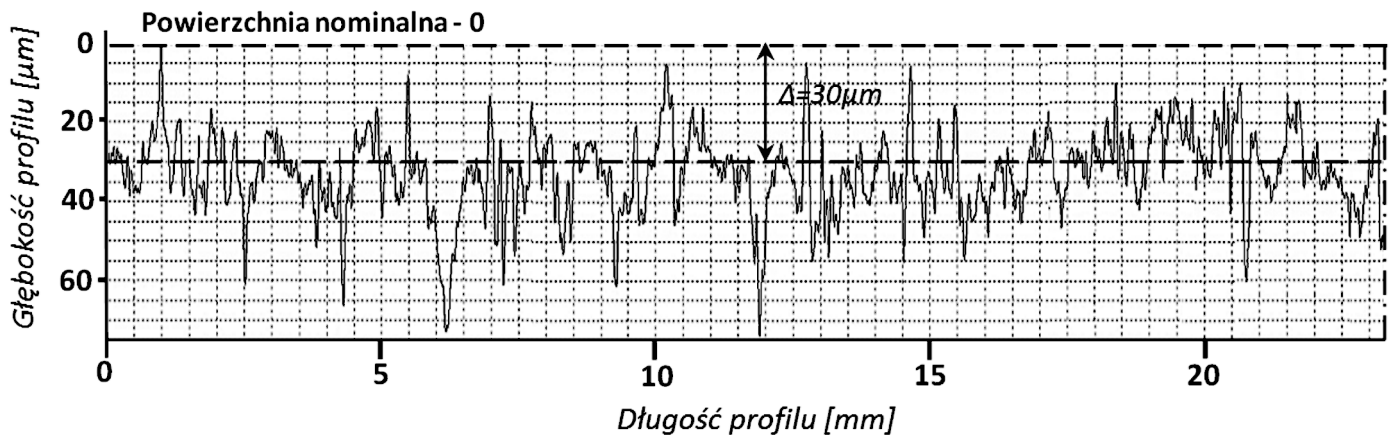
Rys. 2. Schemat i widok ogólny układu do elektroerozyjnego obciążania ściernic supertwardych elektrodą stacjonarną: 1 – ściernica, 2 – elektroda stacjonarna, 3 – szczęki imadła maszynowego, 4 – doprowadzenie napięcia elektrycznego z generatora impulsów, 5 – dysze doprowadzenia dielektryka



Rys. 3. Urządzenie pomiarowe do oceny zdolności skrawnej ściernicy: 1 – silnik krokowy, 2 – przekładnia zębata, 3 – mechanizm dosuwu próbki wraz z czujnikiem siły, 4 – termopara, 5 – próbka, 6 – obejmę montażową, 7 – ściernica.

Widok zamontowanego na szlifierce urządzenia do dwuparametrowej oceny skrawności ściernicy metodą szlifowania wzorca zewnętrznego przedstawiono na rysunku 3.

Dwuparametrowa metoda szlifowania wzorca zewnętrznego opracowana w Politechnice Łódzkiej [6÷7] polega na kilkusekundowym teście szlifowania specjalnego testera, usytuowanego poza strefą szlifowania przedmiotów (rys. 4). Wewnątrz szlifowanego testera umieszczona jest termopara płaszczoza typu K. Wskaźnikami oceny zdolności skrawnych ściernicy są rejestrowane podczas testu szlifowania dwa parametry: ubytek liniowy szlifowanego testera –  $Q_v$ , dosuwanego do ściernicy ze stałą prędkością –  $v_{rw}$  oraz temperatura szlifowania testera –  $\Theta$ , dosuwanego do ściernicy ze stałą siłą –  $F$ . Wartość prędkości dosuwu testera do ściernicy –  $v_{rw}$  oraz siłę dosuwu testera do ściernicy –  $F$  ustalono na podstawie wcześniejszych badań [3, 5], przyjmując odpowiednio:  $v_{rw} = 24 \mu\text{m/s}$ ,  $F = 2 \text{ N}$ .



Rys. 4. Profilogram poprzeczny CPS ściernicy diamentowej „ostrej” SD 1

Prezentowane badania doświadczalne obejmowały dwa etapy, z których pierwszy dotyczył identyfikacji zużycia ściernicy w długotrwałych próbach szlifowania i oceny ich zdolności skrawnych, natomiast etap drugi dotyczył oceny wpływu warunków elektroerozyjnego obciążania elektrodą stacjonarną na kształtowanie zdolności skrawnych ściernicy.

Zakres badań etapu I obejmował:

- pomiary promieniowego zużycia ściernic po długotrwałych próbach szlifowania stopu tytanu za pomocą profilometru PGM-1C IOS Kraków,
- ocenę liczności ziaren diamentowych na CPS na podstawie obrazów mikroskopowych,
- ocenę zdolności skrawnych ściernic na podstawie dwuparametrowej metody szlifowania wzorca zewnętrznego, którą określano względną wydajność szlifowania wzorca –  $Q_v$ , i temperaturę szlifowania wzorca –  $\Theta_v$ .

Zakres badań etapu II dotyczył ustalenia wpływu warunków obciążania elektroerozyjnego elektrodą stacjonarną ściernic diamentowych na kształtowanie ich zdolności skrawnych, ocenianych dwuparametrową metodą szlifowania wzorca zewnętrznego na podstawie względnej wydajności szlifowania wzorca –  $Q_v$  i temperatury szlifowania wzorca –  $\Theta_v$ . Oceniano również wpływ warunków obciążania na względną zużycie elektrody stacjonarnej, wyrażone procentowym wskaźnikiem –  $k_v$ . Warunkami zmiennymi w procesie obciążania były: moc generatora impulsów wyładowań elektroiskrowych oraz dosuw jednostkowy ściernicy do elektrody stacjonarnej.

## WYNIKI BADAŃ

### Ocena zużycia i zdolności skrawnych ściernic diamentowych w długotrwałych próbach szlifowania

#### Ocena promieniowego zużycia ściernic ze ścierniwem diamentowym

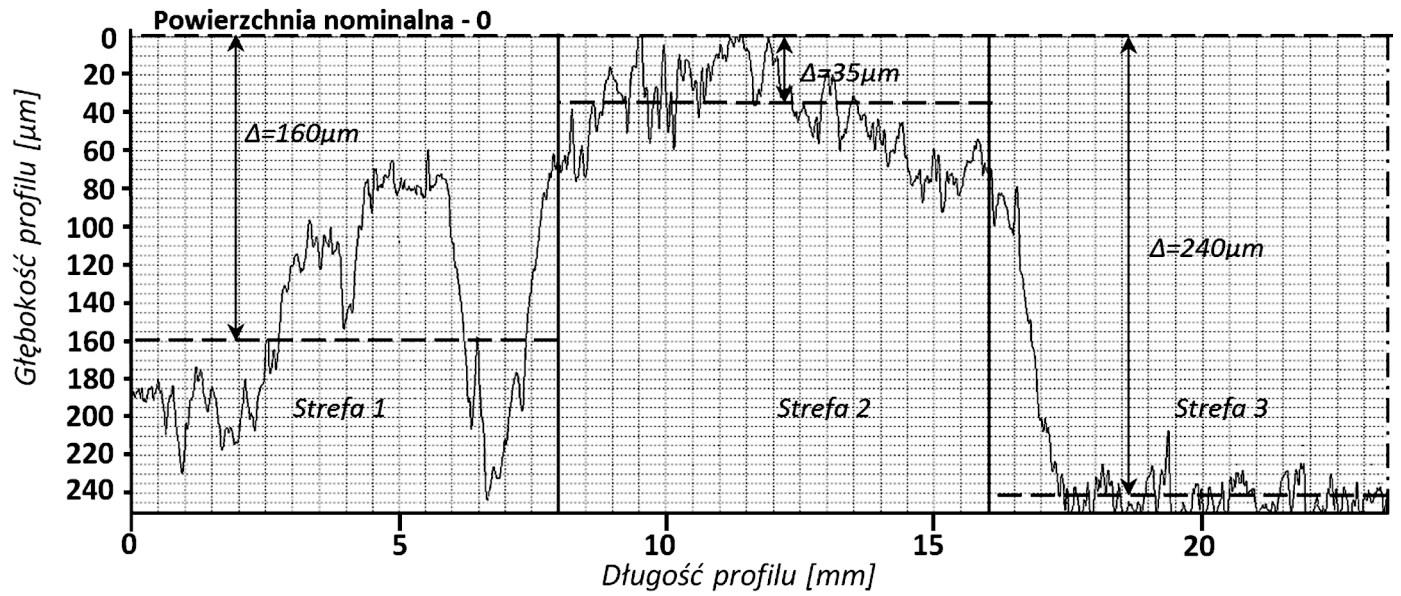
Prezentowane wyniki badań dotyczą porównawczej oceny promieniowego zużycia ściernic ze ściernic diamentowych o charakterystyce technicznej SD 125/100 M75 po zróżnicowanym okresie szlifowania próbek ze stopu tytanu.

Promieniowe zużycie ściernicy oceniano na podstawie profilografowania tworzącej ściernicy. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy profilogram tworzącej ściernicy diamentowej tzw. „ostrej” (po krótkim czasie efektywnego szlifowania wynoszącym około 5 min) oznaczonej jako SD 1, natomiast na rysunku 5 profilogram strefowego zużycia promieniowego ściernicy oznaczonej jako SD 2 po długotrwałych próbach szlifowania elektroerozyjnego. Efektywny czas szlifowania w poszczególnych strefach ściernicy wynosił odpowiednio: około 12 h w strefie 1, około 30 min w strefie 2 i około 25 h w strefie 3.

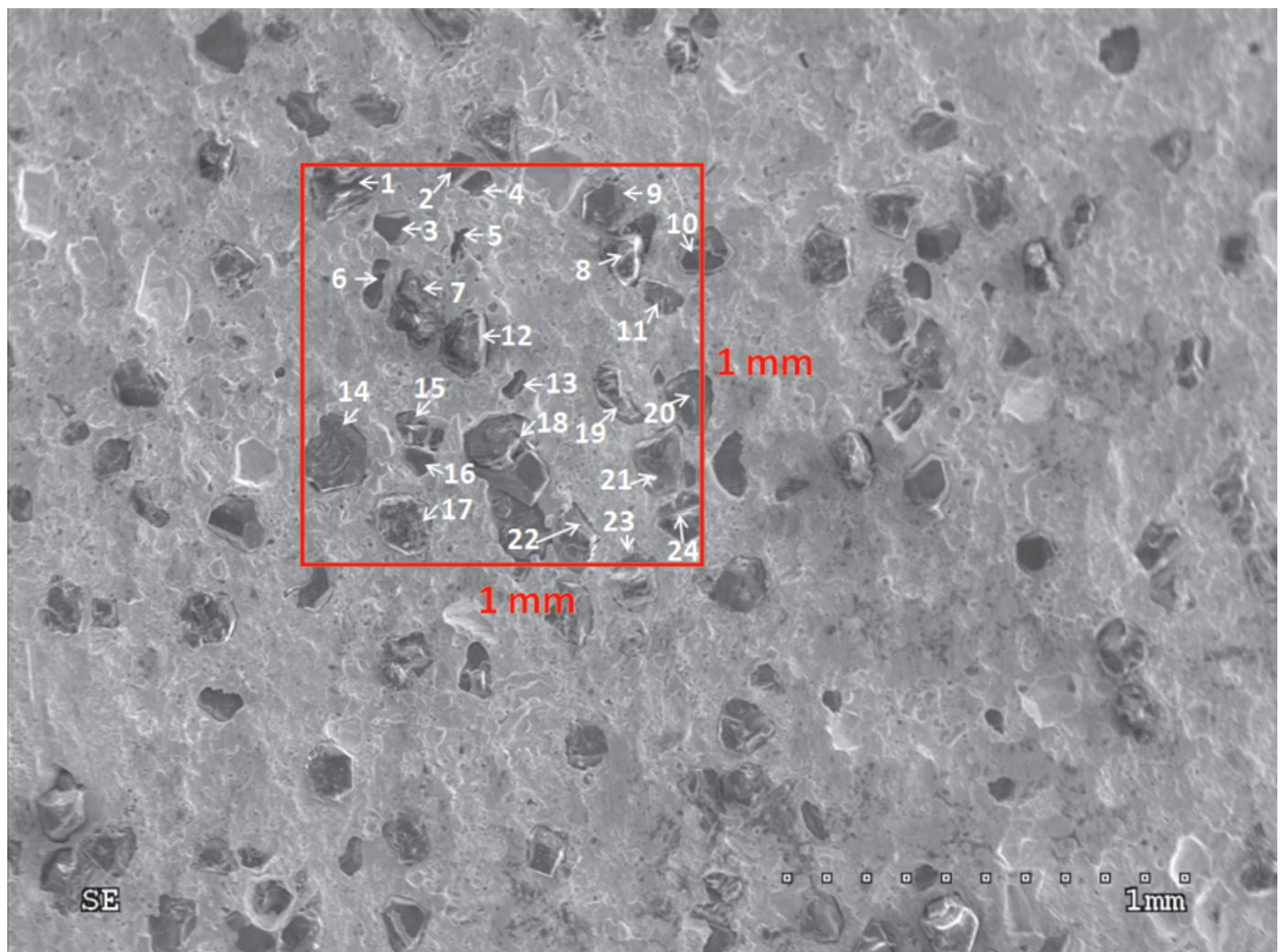
Profilogram tworzącej ściernicy „ostrej” SD1 (rys. 4) charakteryzuje się prostoliniowym zarysem CPS na całej szerokości profilu, a jej zużycie promieniowe na całej szerokości profilu nie przekraczało  $30 \mu\text{m}$ . Z tych powodów tę ściernicę potraktowano w dalszych badaniach porównawczych jako ściernicę „ostrą”. Profilogram tworzącej ściernicy „stępięcej” SD 2 (rys. 5) charakteryzuje się trzema różnymi strefami jej używania w procesie długotrwałych prób szlifowania wąskich próbek ze stopu tytanu. Oszacowane zużycie promieniowe ściernicy  $\Delta$  w poszczególnych strefach wynosiło odpowiednio: dla strefy 1 –  $160 \mu\text{m}$ , dla strefy 2 –  $35 \mu\text{m}$ , a dla strefy 3 –  $240 \mu\text{m}$ .

#### Mikroskopowa ocena liczności ziaren ściernych CPS

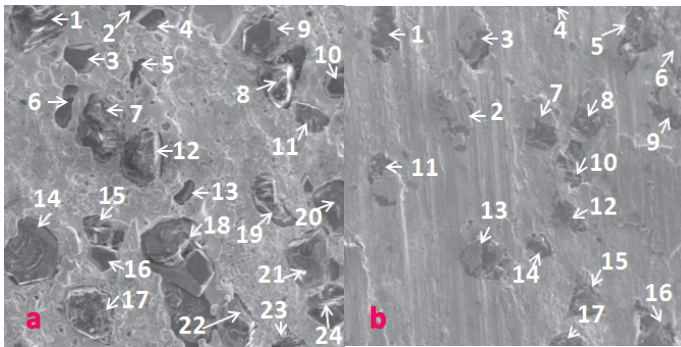
Ocena mikroskopowa CPS miała na celu porównanie liczności ziaren ściernych dla ściernic o zróżnicowanym stopniu zużycia promieniowego. Do oceny liczności ziaren ściernych na CPS wykorzystano mikroskop skaningowy, który umożliwiał wiarygodną obserwację CPS ściernic o zróżnicowanym stopniu ich zużycia. Dla wyznaczonych stref promieniowego zużycia ściernic dokonano obserwacji mikroskopowej CPS. Dla każdej z wyznaczonych stref rejestrowano po pięć pól obrazów CPS o powierzchni  $1 \text{ mm}^2$ , na podstawie których dokonano obliczeń liczności ziaren ściernych, jako średnią arytmetyczną z pięciu pól pomiarowych (rys. 6). Przykładowe obrazy mikroskopowe CPS dla ściernicy „ostrej” i „stępięcej” przedstawiono na rysunku 7, natomiast zbiorcze zestawienie obliczonych wartości średniej liczności ziaren ściernych CPS w poszczególnych strefach zużycia badanych ściernic – w Tabeli 1.



Rys. 5. Profilogram poprzeczny CPS ściernicy diamentowej „stępionej” SD 2



Rys. 6. Przykładowy obraz CPS ściernicy diamentowej „ostrej” SD 1 powiększenie  $\times 50$



Rys. 7. Obraz 1 mm<sup>2</sup> CPS ściernicy ze ścierniwem diamentowym: a) ściernica „ostra” SD 1, b) ściernica „stępiona” SD 2 (strefa 3) powiększenie ×100

Tabela 1. Średnia sumaryczna licznosc ziaren ściernych ściernicy

Stan ściernicy	Średnia licznosc ziaren ściernych ściernicy CPS [ziaren /mm <sup>2</sup> ]		
Ściernica „ostra” SD 1	22	22	22
Ściernica „stępiona” SD 2	16	20	13

Obrazy mikroskopowe CPS ściernicy diamentowej SD 2 „stępionej” w długotrwałych próbach szlifowania charakteryzują się znacznie mniejszą licznoscia sumaryczną ziaren ściernych przypadających na powierzchnię 1 mm<sup>2</sup>, w porównaniu do licznosci ziaren ściernicy „ostrej” SD 1. Te różnice potwierdzają postępujące zużycie ziaren ściernych ściernicy SD 2 oraz ich wyrwanie z CPS, wskutek długotrwałego procesu szlifowania trudnoobrabialnych stopów tytanu. Obrazy mikroskopowe potwierdziły także występowanie zjawiska zalepiania CPS produktami szlifowania.

Ocena zdolności skrawnych ściernic diamentowych na podstawie wskaźników szlifowania wzorca zewnętrznego

Ocena zdolności skrawnych ściernic diamentowych o różnicowanym stopniu ich zużycia polegała na wykonaniu testów szlifowania wzorca zewnętrznego oraz wyznaczeniu wartości wskaźników  $Q_v$  i  $\Theta_t$ . Przykładowe wyniki oceny zdolności skrawnych ilustrujące zmiany wartości wskaźników  $Q_v$  i  $\Theta_t$  dla ściernicy „ostrej” SD 1 i „stępionej” SD 2 (w strefie 2 i 3), przedstawiono na wykresach (rys. 8 i 9). Wartości wskaźników  $Q_v$  i  $\Theta_t$  podane na wykresach odpowiadają wartościom średnim, obliczonym na podstawie 5 pomiarów.

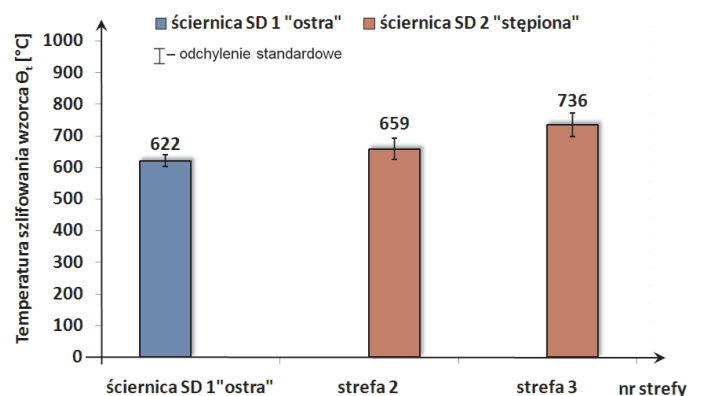
Ocena zdolności skrawnych porównywanych ściernic diamentowych na podstawie wskaźnika  $\Theta_t$ , ujawniła istotne różnice pomiędzy porównywanymi stanami ściernic. Dla ściernicy „ostrej” SD 1 uzyskano najniższą temperaturę szlifowania wzorca –  $\Theta_t$  wynoszącą 622°C. Dla ściernicy „stępionej” SD 2 w strefie 2 stwierdzono wzrost temperatury szlifowania wzorca  $\Theta_t$  o około 6%, a w strefie 3 wzrost temperatury o około 15%.

Podobną tendencję zmian stwierdzono również porównując wskaźniki względnej wydajności szlifowania wzorca –  $Q_v$  dla badanych ściernic (rys. 9). Dla ściernicy „ostrej” SD 1 uzyskano największą jednostkową wydajność szlifowania wzorca, która wynosiła 6,45 mm<sup>3</sup>/min. Dla ściernicy „stępionej” SD 2 w strefie 2 stwierdzono pogorszenie jednostkowej wydajności szlifowania wzorca  $Q_v$  o około 10%, a w strefie 3 o około 16%.

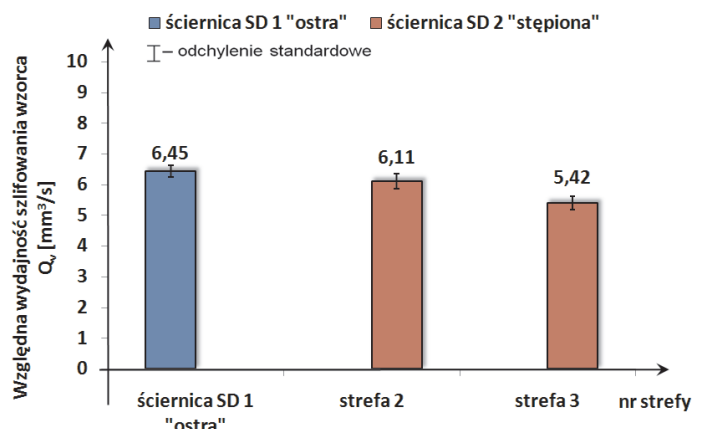
Wykazane różnice w wartościach wskaźników  $\Theta_t$  i  $Q_v$ , potwierdziły utratę zdolności skrawnych ściernicy diamentowej „stępionej” SD 2, zarówno w strefie największego zużycia promieniowego CPS (strefa 3) jak i w strefie 2.

Próby elektroerozyjnego obciążania elektrodą stacjonarną ściernicy diamentowej 175×6×3×50 SD125/100 M100

Badania obejmowały trzy serie prób obciążania ściernic ze ścierniwem diamentowym (175×6×3×50 SD125/100 M100). Realizowano je z następującymi nastawami mocy generatora impulsów prądu: P1 ( $U = 100\text{ V}, I = 12\text{ A}$ ), P2 ( $U = 200\text{ V}, I = 25\text{ A}$ ), P3 ( $U = 300\text{ V}, I = 50\text{ A}$ ). W poszczególnych seriach obciążania różnicowano dosuw jednostkowy ściernicy do elektrody stacjonarnej wynoszący odpowiednio: seria I – 0,005 mm, seria II – 0,010 mm i seria III – 0,015 mm. Wartość sumarycznego dosuwu ściernicy do elektrody wyniosła 0,1 mm, natomiast czas obciążania w kolejnych dosuwach jednost-



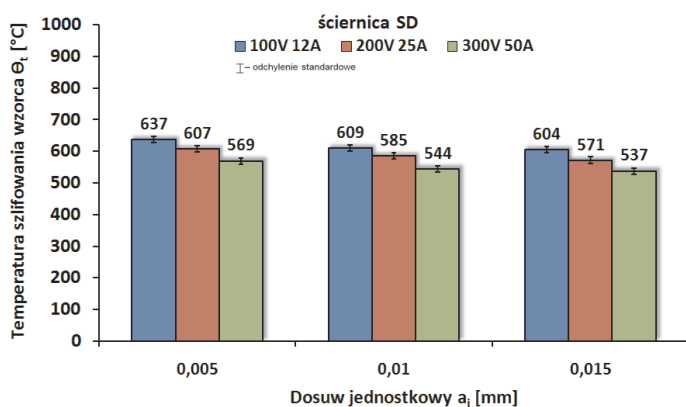
Rys. 8. Porównanie temperatury szlifowania wzorca  $\Theta_t$  ściernic diamentowych SD 1 i SD 2



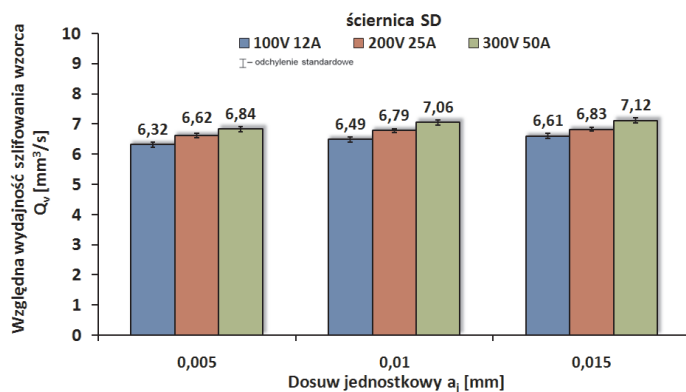
Rys. 9. Porównanie wskaźnika względnej wydajności objętościowej  $Q_v$  ściernic diamentowych SD 1 i SD 2

kowych wynosił 60 s. Zakres badań obejmował ustalenie wpływu mocy generatora impulsów i dosuwu jednostkowego ściernicy do elektrody, na temperaturę szlifowania wzorca –  $\Theta_t$  i względną wydajność szlifowania wzorca –  $Q_v$  oraz ocenę względnego zużycia elektrody –  $k_v$ . Wyniki badań dotyczące oceny wpływu mocy generatora impulsów prądu i dosuwu jednostkowego ściernicy 175×6×3×50 SD125/100 M100 do elektrody stacjonarnej na temperaturę szlifowania –  $\Theta_t$  i względną wydajność szlifowania wzorca przedstawiono na rysunkach 10÷12.

Analiza wyników badań (rys 10 i 11) wykazała, że: wzrost mocy generatora impulsów wyładowań iskrowych korzystnie



Rys. 10. Wpływ mocy generatora i dosuwu jednostkowego podczas obciążania elektroerozyjnego elektrodą stacjonarną ściernicy S3020 175×6×3×50 SD125/100 M100 na temperaturę szlifowania wzorca –  $\Theta_t$

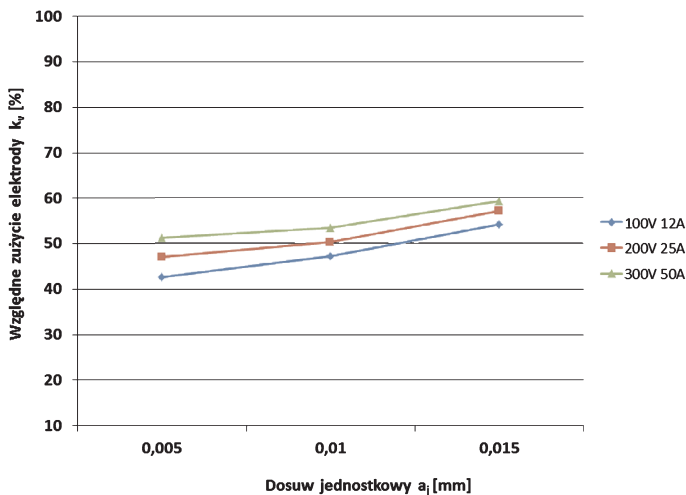


Rys. 11. Wpływ mocy generatora i dosuwu jednostkowego podczas obciążania elektroerozyjnego elektrodą stacjonarną ściernicy S3020 175×6×3×50 SD125/100 M100 na względną wydajność szlifowania –  $Q_v$

wpływa na obniżenie temperatury szlifowania wzorca –  $\Theta_t$  oraz zwiększenie względnej wydajności szlifowania wzorca –  $Q_v$ . W poszczególnych seriach obciążania uzyskano obniżenie temperatury szlifowania wzorca wynoszące: w serii I – 5÷11%, w serii II – 4÷11% i w serii III – 5÷11% oraz wzrost względnej wydajności szlifowania wzorca wynoszący: w serii I – 3÷8%, w serii II – 4÷8% i w serii III – 4÷7%.

Wykazano, że zwiększenie dosuwu jednostkowego ściernicy do elektrody również korzystnie wpływa na obniżenie temperatury szlifowania wzorca –  $\Theta_t$  oraz wzrost względnej





Rys. 12. Wpływ mocy generatora i dosuwu jednostkowego podczas obciążania elektroerozyjnego ściernicy elektrodą stacjonarną S3020 175×6×3×50 SD125/100 M100 na względną wydajność elektrody roboczej

wydajności szlifowania wzorca –  $Q_v$ . Dla poszczególnych wartości mocy generatora uzyskano bowiem obniżenie temperatury szlifowania wzorca –  $\Theta_t$  wynoszące odpowiednio: P1 ( $U = 100\text{ V}$ ,  $I = 12\text{ A}$ ) – spadek temperatury o około 5% w serii II i w serii III, P2 ( $U = 200\text{ V}$ ,  $I = 25\text{ A}$ ) – spadek temperatury o około 4% w serii II oraz 6% w serii III, P3 ( $U = 300\text{ V}$ ,  $I = 50\text{ A}$ ) – spadek temperatury o około 4% dla serii II oraz 6% w serii III. Wzrost wskaźnika względnej wydajności szlifowania wzorca –  $Q_v$  wyniósł natomiast: P1 ( $U = 100\text{ V}$ ,  $I = 12\text{ A}$ ) – wzrost wskaźnika  $Q_v$  o około 3% w serii II i około 4% w serii III, P2 ( $U = 200\text{ V}$ ,  $I = 25\text{ A}$ ) – wzrost wskaźnika  $Q_v$  o około 3% w serii II i III, P3 ( $U = 300\text{ V}$ ,  $I = 50\text{ A}$ ) – wzrost wskaźnika  $Q_v$  o około 3% w serii II i około 4% w serii III. Najmniejszą temperaturę szlifowania wzorca ( $\Theta_t = 537^\circ\text{C}$ ) oraz największą wartość względnej wydajności szlifowania wzorca ( $Q_v = 7,12\text{ mm}^3/\text{s}$ ) uzyskano w warunkach obciążania z największą mocą generatora P3 ( $U = 300\text{ V}$ ,  $I = 50\text{ A}$ ) i największym dosuwem jednostkowym ściernicy –  $a_j = 0,015\text{ mm}$ . Analiza wyników względnego zużycia elektrody roboczej (rys. 12) wykazała, że wraz ze wzrostem mocy generatora impulsów wyładowań elektroiskrowych oraz dosuwu jednostkowego ściernicy elektrody do ściernicy następuje zwiększenie wartości wskaźnika –  $kv$ . Największe względne zużycie elektrody roboczej (około 60%) występuje w warunkach obciążania z dużą mocą generatora P3 ( $U = 300\text{ V}$ ,  $I = 50\text{ A}$ ) i dosuwem jednostkowym ściernicy wynoszącym  $a_j = 0,015\text{ mm}$ .

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły skuteczność kształtowania właściwości skrawnych ściernic supertwardych ze ścierniwami diamentowymi w procesie elektroerozyjnego obciążania elektrodą stacjonarną.

Obiektywną ocenę kształtowych właściwości skrawnych ściernic supertwardych, w procesie elektroerozyjnego obciążania elektrodą stacjonarną, zapewnia dwuparametrowa

metoda szlifowania wzorca zewnętrznego, którą określa się temperaturę szlifowania wzorca –  $\Theta_t$  oraz względną wydajność szlifowania wzorca –  $Q_v$ . Parametry tej oceny ( $\Theta_t$  i  $Q_v$ ) wykazują bowiem wrażliwość na zmianę właściwości skrawnych ściernic supertwardych w procesie szlifowania oraz w zróżnicowanych warunkach elektroerozyjnego obciążania.

Uzyskane wyniki badań uzasadniają kontynuowanie prac nad ustaleniem racjonalnych warunków elektroerozyjnego obciążania tym sposobem oraz jego adaptacji w warunkach przemysłowych.

## Literatura

1. Batako A. D. L., Morgan M. N., Rowe W. B.: High efficiency deep grinding with very high removal rates. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, Vol. 66, pp. 1367-1377.
2. Brinksmeier E., Mutlugunes Y., Klocke, F., Aurich, J. C., Shore P., Ohmori H.: Ultra-precision grinding. *CIRP Annals*, 2010, Vol. 59, pp. 652-671.
3. Gołąbczak, A., Gołąbczak, M., Świącik R., Kaczmarek D.: Ocena zdolności skrawnych ściernic supertwardych po obciążaniu wybranymi sposobami elektroerozyjnymi. *Mechanik*, 2016, Vol. 89, pp. 1356-1357.
4. Gołąbczak, A., Konstantynowicz A., Gołąbczak, M.: Comparative analysis of the surface roughness parameters due to the machining uniformity ". *Defect And Diffusion Forum*, 2016, Vol. 367, pp. 25-33.
5. Gołąbczak A., Koziarski. T.: Assessment method of cutting ability of CBN grinding wheels. *Int. Jour. of Machining & Manufacture*, 2005, 45, 1256-1260.
6. Gołąbczak M., Gołąbczak A., Konstantynowicz A.: Calibration of IR camera for heat generation monitoring during AEDG grinding. *Materialwiss. Werkstofftech*, 2017, Vol. 48, pp. 335-341.
7. Gołąbczak M., Gołąbczak A., Tomczyk B.: Electrochemical and X-ray examinations of erosion products during dressing of superhard grinding wheels using alternating current and ecological electrolytes of low concentration of chemical compounds. *Materials*, 2021, Vol. 14, 1375, pp. 1-22.
8. Hinduja S., Kunieda M.: Modelling of ECM and EDM processes. *CIRP Annals – Manuf. Tech.* 2013, Vol. 62, pp. 775-797.
9. Patel P. R., Thanki S.: Electrochemical grinding process, current state and future direction: A systematic literature review. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2014, Vol. 9, pp. 637-644.
10. Wegener K., Hoffmeister H. W., Karpuschewski B., Kuster F., Hahmann W. C., Rabiey M.: Conditioning and monitoring of grinding wheels. *CIRP Annals*, 2011, Vol. 60, pp. 757-777.
11. Wei Ch., Hu D., Xu K., Ni J.: Electrochemical discharge dressing of metal bond micro-grinding tools. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2011, Vol. 51, pp. 165-168.