



## Badania porównawcze temperatury warstwy wierzchniej w procesie elektroerozyjnego szlifowania (AEDG) materiałów trudnoobrabialnych

Comparative studies of the surface layer temperature during abrasive electro-discharge grinding process (AEDG) of hard machinable materials

ANDRZEJ GOŁĄBCZAK  
ROBERT ŚWIĘCIK  
MARCIN GOŁĄBCZAK  
BARTOSZ STAŃCZYK\*

W artykule przedstawiono wyniki badań temperatury warstwy wierzchniej w procesie elektroerozyjnego szlifowania (AEDG) i porównawczo w procesie szlifowania konwencjonalnego materiałów trudno-obrabialnych (stopu tytanu 6TiAl4V i węglików spiekanych S20S). W porównywanych procesach szlifowania zastosowano ściernice supertwarde ze ścierniwa z regularnego azotku boru (CBN) i diamentu syntetycznego (SD) ze spoiwem metalowym.

**SŁOWA KLUCZOWE:** warstwa wierzchnia, temperatura szlifowania, szlifowanie elektroerozyjne, stopy tytanu, węgiel spiekany.

*In the article the temperature investigation results of surface layer during electrodischarge grinding process (AEDG) and comparatively during conventional grinding process of hard machinable materials (6TiAl4V titanium alloy and S20S sintered carbide) have been presented. In compared grinding processes the superhard grinding wheels with a binder made of cubic boron nitride (CBN) and made of synthetic diamond (SD) have been applied.*

**KEYWORDS:** surface layer, temperature, electrodischarge grinding, hard machinable materials

Jednym z bardzo istotnych czynników, decydujących o jakości i trwałości wyrobów, jest stan warstwy wierzchniej (WW), uzyskiwany m.in. po obróbce wykończeniowej, reali-

zowanej w procesach szlifowania ściernicowego. Temperatura WW w procesie szlifowania jest wynikiem przenikania strumienia ciepła generowanego w tym procesie do czynnej powierzchni ściernicy (CPS) i szlifowanego przedmiotu. Źródłem ciepła w procesie szlifowania jest praca odkształceń plastycznych i sprężystych, dekohezja materiału, a także praca sił tarcia. Wzrost temperatury szlifowania, wskutek działania źródła ciepła, prowadzi do szeregu niekorzystnych zmian WW szlifowanego przedmiotu. Następstwem wysokiej temperatury szlifowania są bowiem przypalenia szlifierskie WW, zmiany strukturalne materiału (np.: hartowanie wtórne, rekryształizacja) oraz niekorzystne naprężenia własne WW [4, 7, 10, 11]. Z tych powodów pomiary temperatury WW w procesie szlifowania mają istotne znaczenie zarówno dla oceny poprawności doboru technologicznych parametrów szlifowania jak i oceny przebiegu procesu oraz uzyskiwanych wyników obróbki. Potwierdzają to liczne publikacje, dotyczące matematycznego opisu zjawisk cieplnych, zachodzących w procesie szlifowania i oceny ich wpływu na kształtowanie właściwości użytkowych WW oraz wyniki badań eksperymentalnych [5, 8, 13].

W procesie szlifowania elektroerozyjnego AEDG występują znacznie trudniejsze problemy z oceną sumarycznego strumienia ciepła oraz jego oddziaływaniem na temperaturę WW [2, 5, 6, 9, 13]. Szlifowanie elektroerozyjne jest bowiem hybrydowym sposobem obróbki, w którym mechanizm usuwania naddatku obróbkowego jest wynikiem synergii iskrowych wyładowań elektrycznych, zachodzących pomiędzy metalowym spoiwem ściernicy a powierzchnią obrabianego przedmiotu oraz skrawania ziaren ściernych CPS. Strumień ciepła generowany w procesie szlifowania AEDG zawiera bowiem ciepło wytworzone w procesie szlifowania konwencjonalnego oraz dodatkowe ciepło pochodzące od wyłado-

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

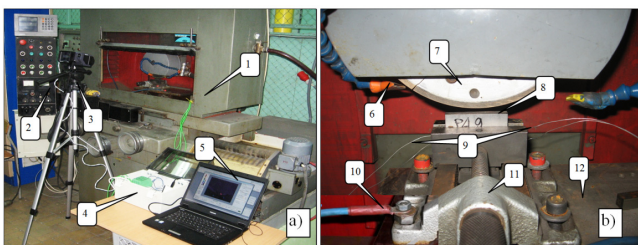
wań elektroiskrowych. Wartość strumienia ciepła w procesie szlifowania AEDG jest więc uzależniona od technologicznych parametrów szlifowania konwencjonalnego oraz elektrycznych parametrów generatora impulsów prądowych. Można oczekiwać, że w tych warunkach szlifowania wystąpi istotne zwiększenie gęstości strumienia ciepła, powodując wzrost temperatury WW, skutkujący niekorzystnymi zmianami fizycznych właściwości technologicznej WW [1, 3, 5, 8, 12]. Należy podkreślić, że w procesie szlifowania AEDG wykorzystywane są ściernice supertwarde ze spoiwem metalowym. Większa przewodność cieplna tego typu ścierniwi może więc korzystnie wpływać na intensywność odprowadzenia ciepła ze strefy obróbki, skutkując obniżeniem temperatury. Celowym jest zbadanie rozkładu temperatury w strefie kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym, które może mieć znaczenie poznawcze oraz istotne znaczenie aplikacyjne, zwłaszcza przy projektowaniu operacji szlifierskich trudno- skrawalnych materiałów konstrukcyjnych, w warunkach przemysłowego zastosowania procesu AEDG.

Autorzy pracy skoncentrowali uwagę na badaniach eksperymentalnych rozkładu temperatury WW trudnoskrawalnych materiałów konstrukcyjnych (stopu tytanu i węgla spiekane) w procesie szlifowania AEDG oraz porównawczo w procesie szlifowania konwencjonalnego. Do pomiarów i rejestracji temperatury wykorzystuje się różne metody pomiarowe, które polegają na zastosowaniu, np.: pirometrów radiacyjnych, termopar i termoelementów obcych, pomiarów temperatury wiórów, termokolorów naniesionych na powierzchni ściernicy oraz obrazów termowizyjnych w podczerwieni rejestrowanych kamerą termowizyjną [6, 10, 11].

W realizowanych badaniach zastosowano metodę pomiaru za pomocą układu termopar, umieszczonych w szlifowanych próbkach wzdłuż posuwu stołu szlifierki. Próby szlifowania realizowano ściernicami supertwardymi ze ścierniwem z regularnego azotku boru (CBN) i diamentu syntetycznego (SD), spojonych spoiwem metalowym.

### Metodyka i warunki badań

Badania doświadczalne polegały na określeniu temperatury WW stopu tytanu 6TiAl4V oraz węglików spiekanych S20S, w procesie szlifowania AEDG i porównawczo szlifowania konwencjonalnego. Procesy szlifowania realizowano na stanowisku badawczym, wyposażonym w szlifierkę do płaszczyzn typu ECBT8, generator impulsów wyładowań iskrowych typu GMP75, układy kontrolno-pomiarowe parametrów szlifowania oraz komputerowy system rejestracji wyników badań. Widok stanowiska badawczego i jego zespołów funkcjonalnych przedstawiono na rys. 1.



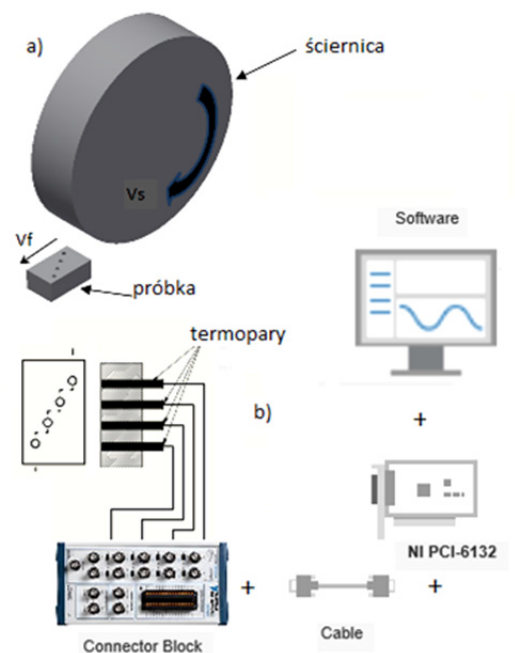
Rys. 1. Stanowisko badawcze: a) widok ogólny, b) strefa szlifowania: 1 – szlifierka ECBT-8, 2 – pulpit sterowniczy, 3 – kamera termowizyjna, 4 – układ rejestrujący, 5 – komputer, 6 – dysze doprowadzające dielektryk, 7 – ściernica, 8 – szlifowana próbka, 9 – termopara, 10 – doprowadzenie napięcia z generatora, 11 – imadło, 12 – stół szlifierki

Zakres badań eksperymentalnych obejmował próby węgłębne szlifowania AEDG płaskich próbek ze stopu

tytanu Ti6Al4V oraz węgla spiekane S20S (o wymiarach 40x20x10) ściernicą z regularnego azotku boru ze spoiwem metalowym (CBN 125/100 M75) oraz ściernicą diamentową (SD 125/100 M75). Proces szlifowania AEDG realizowano w obecności dielektryka, którym była woda destylowana. Szlifowanie konwencjonalne przeprowadzono w warunkach szlifowania na „sucho” i z chłodzeniem cieczą dielektryczną. W realizowanych badaniach, zmiennymi wielkościami wejściowymi były warunki elektryczne generatora, tj.: napięcie robocze –  $U$  [V], prąd roboczy –  $I$  [A]. Pozostałe parametry elektryczne, tj.: czas impulsu –  $t_o$  [ $\mu$ s] i czas przerw –  $t_p$  [ $\mu$ s] oraz parametry szlifowania, tj.: prędkość posuwu wzdłużnego szlifowanego przedmiotu –  $v_f$ , dosuw ściernicy do przedmiotu –  $a$  i prędkość szlifowania –  $v_s$ , dobrano na podstawie wcześniejszych wyników badań.

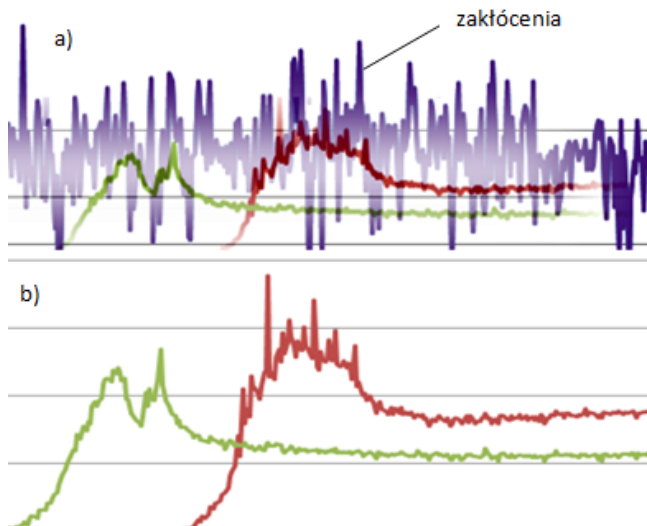
W próbach szlifowania konwencjonalnego zastosowano następujące parametry technologiczne:  $v_s=30$  m/s,  $a=20$   $\mu$ m,  $v_f=0,5$  m/min. Poszczególne próby szlifowania oznaczono kodowo, przyjmując jako: P1 - szlifowanie konwencjonalne na sucho, P2 - szlifowanie konwencjonalne z chłodzeniem cieczą dielektryczną. Próby szlifowania AEDG przeprowadzono dla trzech zakresów parametrów elektrycznych generatora, oznaczonych kodowo P3, P4, P5. W tych próbach stosowano następujące parametry elektryczne generatora: P3:  $U=100$  V,  $I=8$  A; P4:  $U=150$  V,  $I=12$  A i P5:  $U=200$  V,  $I=25$  A. Czas trwania impulsu  $t_o$  ustalony został na poziomie 32  $\mu$ s, natomiast czas przerw  $t_p$  – 63  $\mu$ s.

Pomiary wartości temperatury prowadzono przy użyciu termopar typu K, podłączonych do karty pomiarowej PCI-6123 firmy National Instruments, za pomocą terminalu BNC-2110. Rejestrowane wyniki pomiarów temperatury rejestrowano w pamięci komputera, celem dalszej ich obróbki. Do komunikacji pomiędzy komputerem a układem rejestrującym wykorzystano oprogramowanie LabVIEW 2012. Pomiary temperatury przeprowadzono za pomocą 4 termopar, rozmieszczonych w szlifowanej próbce liniowo, w układzie skośnym do kierunku posuwu. Schemat układu pomiarowego oraz rozłożenie termopar w szlifowanych próbkach przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat pomiaru temperatury szlifowania metodą termopar: a) widok ogólny, b) rozmieszczenie termopar i sposób podłączenia aparatury pomiarowej

Przeprowadzone próby testowe pomiaru temperatury z wykorzystaniem termopar w procesie szlifowania AEDG ujawniły istotne trudności w identyfikacji sygnału pomiarowego z termopar. Stwierdzono bowiem, że sygnał pomiarowy z termopar (w przedziale napięcia  $0 \div 10$ ) jest silnie zakłócany przez pole elektromagnetyczne generatora impulsów prądowych oraz wyładowania elektroiskrowe w procesie AEDG. W celu wyeliminowania tych zakłóceń opracowano cyfrowy filtr komputerowy wraz z odpowiednim algorytmem, który umożliwił odseparowanie tych zakłóceń. Podstawową zaletą opracowanego sposobu filtracji i eliminacji zakłóceń jest to, że nie wymaga on budowy dodatkowego układu elektronicznego. Na rysunku 3 przedstawiono porównanie niefiltrowanych sygnałów pomiarowych (rys. 3a) oraz odfiltrowanych sygnałów pomiarowych z termopar przez opracowany filtr cyfrowy (rys. 3b). Uzyskano zatem wiarygodne sygnały pomiarowe z termopar, pozbawione zakłóceń od pola elektromagnetycznego i wyładowań elektroiskrowych. W realizowanych próbach szlifowania rejestrowano komputerowo przebiegi zmian sygnałów pomiarowych, które po odfiltrowaniu posłużyły do określenia maksymalnej temperatury WW.



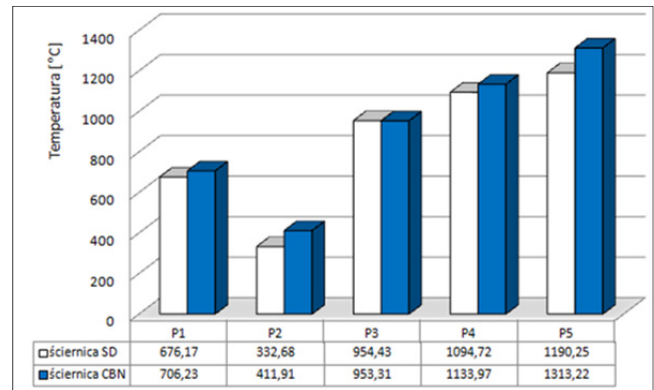
Rys. 3. Porównanie przykładowych sygnałów pomiarowych z termopar: a) przebieg sygnału niefiltrowanego, b) przebieg odfiltrowania po odfiltrowaniu zakłóceń

### Wyniki pomiaru temperatury WW w procesie szlifowania stopu tytanu

Badania doświadczalne obejmowały próby szlifowania próbek ze stopu tytanu Ti6Al4V metodą AEDG (próby P3, P4, P5) i porównawczo metodą konwencjonalną na sucho (próba P2) oraz z chłodzeniem cieczą dielektryczną (próba P1). Wyniki pomiaru maksymalnej temperatury WW stopu tytanu, uzyskane w poszczególnych próbach szlifowania konwencjonalnego i AEDG z zastosowaniem ściernic CBN i SD, przedstawiono na wykresie (rys. 4). Wartości maksymalnej temperatury WW w poszczególnych próbach szlifowania (rys. 4) dotyczą wartości średniej, obliczonej na podstawie wskazań z czterech termopar uzyskanych w pięciu próbach szlifowania.

Wyniki badań potwierdziły istotny wpływ parametrów elektrycznych generatora impulsów prądowych ( $U$ ,  $I$ ) w procesie AEDG na wartość maksymalnej temperatury WW (rys. 4). Wraz ze zwiększaniem parametrów elektrycznych generatora impulsów ( $U$ ,  $I$ ) obserwowany jest istotny wzrost temperatury szlifowania WW, zarówno dla procesów realizowanych ściernicą SD, jak i ściernicą CBN. Największą wartość temperatury WW uzyskano dla procesu AEDG rea-

lizowanego ściernicą CBN z dużymi nastawami napięcia i natężenia prądu (P5).



Rys. 4. Wyniki pomiaru temperatury szlifowania WW stopu tytanu 6Ti4AlV w procesie szlifowania konwencjonalnego i AEDG

Temperatura ta była wyższa o około 27% w porównaniu do procesu AEDG realizowanego z małymi nastawami napięcia i natężenia prądu (P3). Podobną tendencję zaobserwowano również w procesie szlifowania AEDG ściernicą SD. Stosując duże wartości parametrów elektrycznych generatora (próba P5), uzyskano wyższą temperaturę WW o około 20%, w porównaniu do procesu realizowanego z małymi nastawami napięcia i natężenia prądu (P3). Nie stwierdzono natomiast istotnych różnic w wartościach temperatury WW uzyskanych w procesach szlifowania AEDG, realizowanych ściernicami SD i CBN, z małymi wartościami napięcia i natężenia prądu (P3).

Wyniki badań potwierdziły także wpływ rodzaju ściernicy na maksymalną temperaturę WW, obserwowaną zarówno w procesie szlifowania konwencjonalnego (P1 i P2), jak i AEDG (P3, P4, P5). Stwierdzono bowiem niższą temperaturę szlifowania WW dla procesów szlifowania realizowanych ściernicą ze ścierniwa diamentowego (SD). Dla ściernicy SD zaobserwowano obniżenie temperatury WW w tych procesach, wynoszące odpowiednio: 5% dla szlifowania konwencjonalnego z chłodzeniem (P1) i 19% dla szlifowania konwencjonalnego na sucho (P2) oraz dla szlifowania AEDG od 4% (P3) do 20% (P5), w porównaniu do szlifowania ściernicą CBN. Uzyskane niższe wartości temperatury WW w tych procesach należy wiązać z większym współczynnikiem przewodzenia ciepła ściernicy SD.

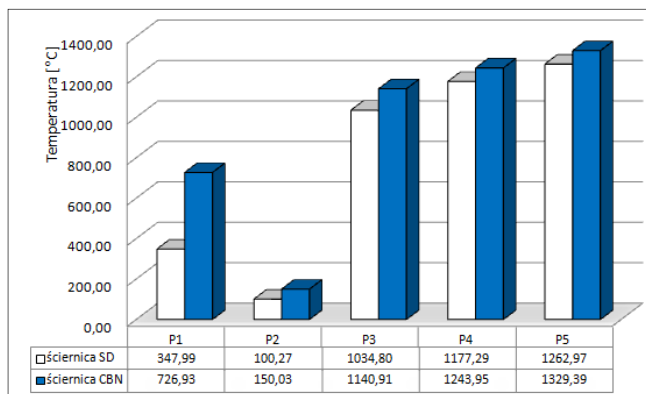
### Badania temperatury szlifowania węglików spiekanych

Badania doświadczalne obejmowały próby szlifowania węglików spiekanych S20S metodą AEDG i porównawczo metodą konwencjonalną na sucho i z chłodzeniem dielektrykiem. Zakres realizowanych badań doświadczalnych był podobny do prób szlifowania stopu tytanu. Wyniki pomiaru maksymalnej temperatury WW węglików spiekanych, uzyskane w poszczególnych próbach szlifowania konwencjonalnego i AEDG z zastosowaniem ściernic CBN i SD, przedstawiono na wykresie (rys. 5). Podobnie, jak w przypadku szlifowania stopu tytanu, wartości maksymalnej temperatury WW w poszczególnych próbach szlifowania (rys. 5), dotyczą wartości średniej, obliczonej na podstawie wyników pomiaru z czterech termopar, uzyskanych w pięciu próbach szlifowania.

Porównanie uzyskanych wyników pomiaru temperatury WW w procesie szlifowania AEDG węglików spiekanych (rys. 5) z temperaturą WW szlifowania stopu tytanu (rys. 4) wskazuje, że są one wyższe dla wszystkich prób szlifowania (P3-P5). Procentowy wzrost temperatury WW w tym

procesie wynosił odpowiednio: 6-8% dla prób szlifowania AEDG ściernicą ze ścierniw diamentowych SD i 3-17% dla prób szlifowania AEDG ściernicą CBN.

Wyniki badań potwierdziły również niewielki wpływ parametrów elektrycznych generatora impulsów prądowych (U, I) w procesie szlifowania AEDG węglików spiekanych na wzrost wartości maksymalnej temperatury WW (rys. 5), realizowanych zarówno ściernicą ze ścierniw diamentowych SD jak i ściernicą CBN.



Rys. 5. Wyniki pomiaru temperatury szlifowania WW węglików spiekanych w procesie szlifowania konwencjonalnego i AEDG

W warunkach szlifowania AEDG z dużymi nastawami napięcia i natężenia prądu (P5), uzyskano bowiem wzrost temperatury WW wynoszący odpowiednio: około 8% dla ściernicy ze ścierniw diamentowych SD i około 3% dla ściernicy CBN.

Bardzo istotne różnice w wartościach maksymalnej temperatury WW uwidoczniły się natomiast w procesach szlifowania konwencjonalnego i AEDG. W procesie szlifowania AEDG realizowanego z dużymi nastawami napięcia i natężenia prądu (P5) ściernicą CBN zaobserwowano wzrost temperatury WW o około 885%, w porównaniu do szlifowania konwencjonalnego z chłodzeniem dielektrykiem (P2) oraz około 182% w przypadku szlifowania na sucho (P1).

Relatywnie wysokie wartości temperatury WW uzyskano także w procesie AEDG realizowanego z małymi i średnimi nastawami napięcia i natężenia prądu (P3 i P4). Zaobserwowano tu wzrost temperatury o około 760-830% w porównaniu do szlifowania konwencjonalnego z chłodzeniem dielektrykiem (P2) oraz około 157-170% w przypadku procesu szlifowania na sucho (P1).

Wyniki badań potwierdziły także podobną tendencję wpływu rodzaju ściernicy na maksymalną temperaturę WW, obserwowanego zarówno procesie szlifowania konwencjonalnego (P1 i P2), jak i AEDG (P3, P4, P5). Niższą temperaturę WW stwierdzono dla procesów szlifowania realizowanych ściernicą ze ścierniwa diamentowego (SD). Dla ściernicy SD zaobserwowano obniżenie temperatury WW w tych procesach, wynoszące odpowiednio: około 5% dla szlifowania konwencjonalnego z chłodzeniem dielektrykiem (P2) i około 19% dla szlifowania konwencjonalnego na sucho (P1) oraz dla szlifowania AEDG od 4% (P3) do 20% (P5), w porównaniu do szlifowania ściernicą CBN. Uzyskane niższe wartości temperatury WW w tych procesach należy również wiązać z większym współczynnikiem przewodzenia ciepła ściernicy SD.

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania umożliwiły sprawdzenie przydatności zmodyfikowanej metody termoparowej do pomiaru temperatury WW w procesie szlifowania konwencjonalnego i elektroerozyjnego AEDG stopu tytanu Ti6Al4V oraz węglików spiekanych S20S.

Wyniki badań potwierdziły wpływ parametrów elektrycznych generatora (napięcia i natężenia prądu) w procesie szlifowania AEDG na maksymalną temperaturę WW. Zwiększenie tych parametrów w procesie AEDG powoduje istotny wzrost temperatury WW.

Badania ujawniły istotny wpływ rodzaju ścierniwa ściernic supertwardych, zastosowanych w procesach szlifowania konwencjonalnego i AEDG stopu tytanu i węglików spiekanych, na temperaturę szlifowania WW. Wykazano, że w obu tych procesach ściernice ze ścierniwem diamentowym SD generują niższą temperaturę WW, w porównaniu do ściernic CBN.

## LITERATURA

- Gołąbczak A., Świąć R., Electro-discharge Grinding: Energy Consumption and Internal Stresses in the Surface Layer. Proceedings 16<sup>th</sup> International Symposium for Electromachining, ISEM XVI, Shanghai, China, 2010, 517-522.
- Gołąbczak A., Świąć R., Studies of The Process of Electrodischarge Grinding of Hard Metals, Proceedings 15<sup>th</sup> International Symposium for Electromachining ISEM XV, Pittsburgh, 2007, 445-449.
- Gołąbczak A., Świąć R., Assessment of Energy Consumption and Internal Stresses in Surface Layer in the Abrasive Electro-discharge Grinding (AEDG) Process. Defect and Diffusion Forum Vols. 334-335 (2013) pp 89-96.
- GUO C., MALKIN S., Analytical and Experimental Investigation of Burnout in Creep-Feed Grinding, Annals of the CIRP, 43/1,1994, 283-286.
- JAIN V., MOTE RAKESH G., On the temperature and specific energy during electrodischarge diamond grinding (EDDG), International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 26, 2005, 56-67.
- JILANI S.T., PANDEY P.C., Analysis of surface erosion in electrical discharge machining, Wear 84/3) 1983, 275-284.
- KRUSZYŃSKI B., Surface Integrity in Grinding, Monographs, Technical University of Lodz, 2001.
- MALKIN S., GUO C., Thermal Analysis of Grinding, Annals of the CIRP, Vol. 56/2, 2007, 760-782.
- OCZOŚ K., Selected problems of abrasive hybrid machining, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214/10, 2001, 360-366.
- ROWE W., Experimental Investigation of Heat Transfer in Grinding, Annals of the CIRP, vol. 44, 1995, 329-332.
- SATO K., Grinding Temperature, Bull. Japan Soc. Grind. Eng., Vol. 96 1974, 1177-1183.
- ŚWIĄĆ R., Experimental investigation of abrasive electrodischarge grinding of Ti6Al4V titanium alloy, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2009, 37/2, pp.: 706-711.
- YADAVA V., JAIN V. K., DIXIT M., Parametric Study of Temperature Distribution in Electrodischarge Diamond Grinding, Materials and Manufacturing Processes, Vol. 19/6, 2004, 1071-1101.