

# WPLYW WARUNKÓW SZLIFOWANIA AEDG STOPÓW TYTANU NA TEMPERATURĘ SZLIFOWANIA I STAN NAPRĘŻEŃ WŁASNYCH W WARSTWIE WIERZCHNIEJ

Andrzej GOŁĄBCZAK<sup>1</sup>, Robert ŚWIĘCIK<sup>1</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Temperatura w strefie szlifowania jest jednym z decydujących czynników o ostatecznych wynikach tego procesu. Wpływa ona zarówno na trwałość ściernicy, jak również na jakość szlifowanego przedmiotu. Przekroczenie określonych wartości temperatury podczas szlifowania, może spowodować w przedmiocie obrabianym zmiany w dokładności wymiarowo-kształtowej, a także niekorzystne zmiany w warstwie wierzchniej przedmiotu. Do najważniejszych zaliczyć można m.in.: przypalenia szlifierskie, zmiany strukturalne materiału (np.: hartowanie wtórne i rekrytalizacja) oraz stan naprężeń własnych [3, 5, 7–8].

Jednym z czynników, decydujących o wartości temperatury w strefie szlifowania i warstwie wierzchniej, są parametry obróbki. W przypadku szlifowania konwencjonalnego tymi parametrami są: głębokość szlifowania, prędkość posuwu wzdłużnego przedmiotu, prędkość obwodowa i stan CPS ściernicy. W procesie szlifowania elektroerozyjnego AEDG, oprócz wymienionych parametrów, dodatkowo dochodzą jeszcze parametry elektryczne generatora wyładowań elektroiskrowych. Bezpośrednim efektem wyładowań iskrowych jest wydzielanie się ciepła, co z kolei prowadzi do wzrostu temperatury szlifowanego przedmiotu oraz ściernicy. Wartość temperatury przedmiotu w strefie szlifowania jest uzależniona m.in. od gęstości strumienia ciepła, rzeczywistej długości styku ściernicy z przedmiotem szlifowanym oraz właściwości cieplnych ściernicy i obrabianego materiału [4, 9].

Poznanie rozkładu temperatur w strefie kontaktu ściernicy z materiałem obrabianym może mieć istotne znaczenie aplikacyjne, zwłaszcza przy projektowaniu operacji szlifierskich trudno skrawalnych materiałów konstrukcyjnych, w warunkach

---

<sup>1</sup> Politechnika Łódzka, Katedra Technologii Maszyn, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź

przemysłowego zastosowania procesu szlifowania AEDG.

Autorzy pracy skoncentrowali uwagę na zbadaniu rozkładu temperatury szlifowania procesu AEDG oraz porównawczo w procesie szlifowania konwencjonalnego. W artykule przedstawiono kontynuację zapoczątkowanych w pracach [1, 2] badań, dotyczących pomiarów temperatury w strefie kontaktu ściernicy z przedmiotem szlifowanym.

## 2. STANOWISKO BADAWCZE I PRZEBIEG EKSPERYMENTU

Jednym z podstawowych etapów oceny wpływu ciepła generowanego w strefie szlifowania na jakość powierzchni przedmiotu po obróbce jest znajomość rozkładu wartości temperatury na powierzchni przedmiotu obrabianego oraz ściernicy. Przeprowadzono badania, mające na celu ustalenie charakteru zmian wartości temperatury w warstwie wierzchniej przedmiotu, podczas szlifowania elektroerozyjnego AEDG oraz porównawczo dla szlifowania konwencjonalnego. Pomiary wartości temperatury prowadzono przy użyciu termopar typu K, podłączonych do listwowych mikroprocesorowych przetworników temperatury LMPT-21ME, z których sygnał pomiarowy przekazywany był do karty pomiarowej USB-6009 firmy National Instruments. Rejestrowane wyniki pomiarów temperatury przekazywano poprzez złącze USB do komputera. Do komunikacji pomiędzy komputerem a układem rejestrującym wykorzystano oprogramowanie LabVIEW2010.

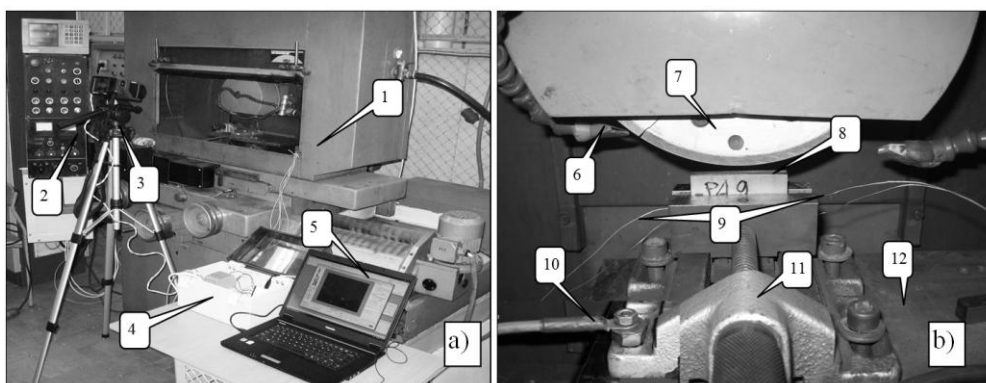
Proces szlifowania AEDG realizowano na stanowisku badawczym wyposażonym w szlifierkę do płaszczyzn typu ECBT8, generator impulsów wyładowań iskrowych typu GMP75, oraz układy kontrolno-pomiarowe parametrów szlifowania i komputerowy system rejestracji wyników badań. Podstawowe zespoły funkcjonalne stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1.

Zakres badań obejmował próby wglębnego szlifowania AEDG płaskich próbek ze stopu tytanu Ti6Al4V (o wymiarach 55x20x10) ściernicą z regularnego azotku boru (CBN 125/100 M75) i ściernicą diamentową (SD 125/100 M75) ze spoiwem metalowym. Procesy szlifowania AEDG realizowano w obecności dielektryka, jakim była woda destylowana.

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 [3, 7].

Badania przeprowadzono dla trzech zakresów parametrów elektrycznych generatora, oznaczonych kodowo: P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>. W procesie szlifowania AEDG stosowano następujące parametry elektryczne generatora: P<sub>1</sub>:  $U=100V$ ,  $I=8A$ ; P<sub>2</sub>:  $U=150V$ ,  $I=12A$  i P<sub>3</sub>  $U=200V$ ,  $I=25A$ . Czas trwania impulsu  $t_o$  wynosił 32  $\mu$ s, natomiast czas

przerw między impulsami  $t_p = 63 \mu s$ . W procesie szlifowania konwencjonalnego i AEDG stosowano następujące parametry kinematyczne:  $v_s=30 \text{ m/s}$ ,  $a=20 \mu m$ ,  $v_f=0,5 \text{ m/min}$ .



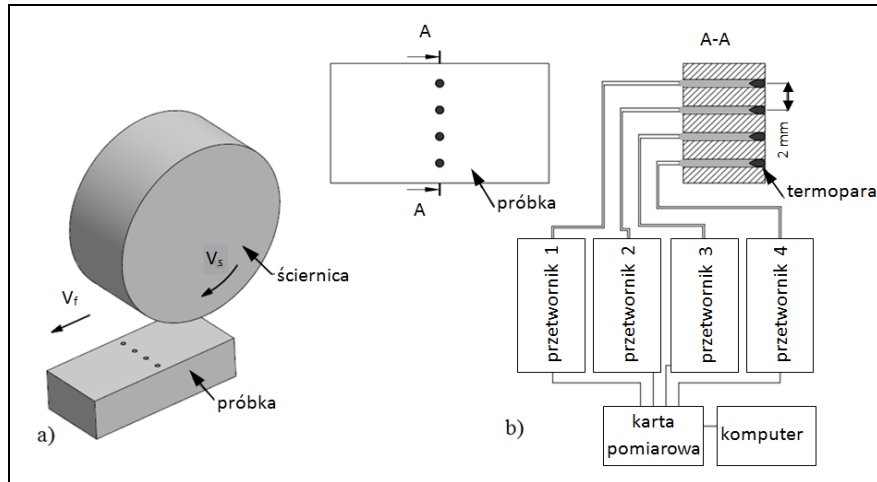
Rys. 1. Stanowisko badawcze: a) widok ogólny, b) strefa szlifowania: 1 – szlifierka ECBT-8, 2 – pulpit sterowniczy, 3 – kamera termowizyjna, 4 – układ rejestrujący, 5 – komputer, 6 – dysze doprowadzające dielektryk, 7 – ściernica, 8 – szlifowana próbka, 9 – termopara, 10 – doprowadzenie napięcia z generatora,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

### 3. BADANIA DOŚWIADCZALNE

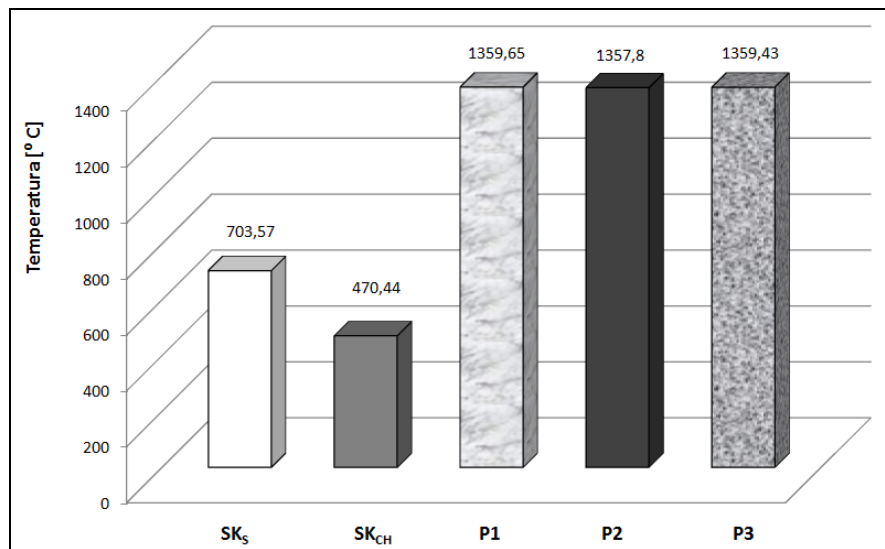
Badania doświadczalne obejmowały próby szlifowania stopu tytanu Ti6Al4V metodą AEDG i porównawczo metodą konwencjonalną z użyciem cieczy chłodzącej (dielektryk) -SK<sub>CH</sub> i „na sucho” -SK<sub>S</sub>. Zakres realizowanych badań doświadczalnych obejmował dwa etapy: pierwszy etap dotyczył zbadania rozkładu temperatury szlifowania procesu AEDG z użyciem ściernicy diamentowej i ściernicy CBN, drugi etap - obejmował pomiar naprężeń własnych w warstwie wierzchniej (WW).

Pomiary temperatury w pierwszym etapie przeprowadzono za pomocą 4 termopar typu K, rozmieszczonych w szlifowanej próbce liniowo w kierunku prostopadłym do posuwu, w odległości 2 mm każda. Schemat układu do pomiaru temperatury szlifowania przedstawiono na rysunku 2. Pomiary rejestrowano za pomocą komputera wyposażonego w kartę pomiarową i listwowe, mikroprocesorowe przetworniki temperatury. Zarejestrowane przebiegi zmian temperatury były podstawą do określania temperatury procesu szlifowania. Ustalono średnią wartość maksymalnej temperatury szlifowania na podstawie pięciu najwyższych wartości odczytów z wykresów dla czterech termopar.

Wyniki pomiarów temperatury, uzyskane w procesie szlifowania AEDG stopu tytanu Ti6Al4V ściernicą CBN, realizowanego z dodatnią polaryzacją przedmiotu obrabianego, przedstawiono na wykresie (rys. 3).



Rys. 2. Schemat układu termopar do pomiaru temperatury w strefie szlifowania:  
a) widok ogólny, b) rozmieszczenie termopar w szlifowanej próbce



Rys. 3. Porównanie wartości temperatury w strefie szlifowania ściernicą CBN:  
SK<sub>s</sub>- szlifowanie konwencjonalne „na sucho”, SK<sub>CH</sub>- szlifowanie konwencjonalne z cieczą chłodzącą

Analiza wyników (rys.3) wskazuje na istotny wzrost temperatury w procesie szlifowania AEDG. Dla badanych zakresów napięcia i natężenia prądu

generatora wyładowań ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ) uzyskano porównywalne wartości temperatury. Były one wyższe o około 65% w porównaniu do procesu szlifowania konwencjonalnego z chłodzeniem cieczą dielektryczną ( $SK_{CH}$ ) i około 48% w porównaniu do szlifowania konwencjonalnego na sucho ( $SK_S$ ).

Należy podkreślić, że uzyskane temperatury w tym procesie są maksymalnymi średnimi wartościami, jakie można zmierzyć za pomocą termopar typu K. Przyjąć można, że w procesie szlifowania AEDG wartości temperatury na styku ściernica przedmiot obrabiany mogą być znacznie wyższe. Na tym etapie badań, zagadnienie to wykracza jednak poza możliwości posiadanego układu pomiarowego.

Uzyskane wyniki badań potwierdziły wcześniejsze spostrzeżenia autorów prezentowane w pracy [1], w której wykazano, że wraz ze wzrostem parametrów elektrycznych zwiększa się także temperatura procesu AEDG. Należy nadmienić, że w tych badaniach termopary były rozmieszczone w próbce liniowo w kierunku wzdłużnym do kierunku posuwu szlifowania. Rejestrację temperatury prowadzono przy wykorzystaniu rejestratora ekranowego firmy LUMEL KD-7. W tych warunkach szlifowania AEDG i sposobie rejestracji wyników, uzyskano znacznie niższe wartości temperatury szlifowania. Były one o około 56% niższe od uzyskiwanych w niniejszej pracy.

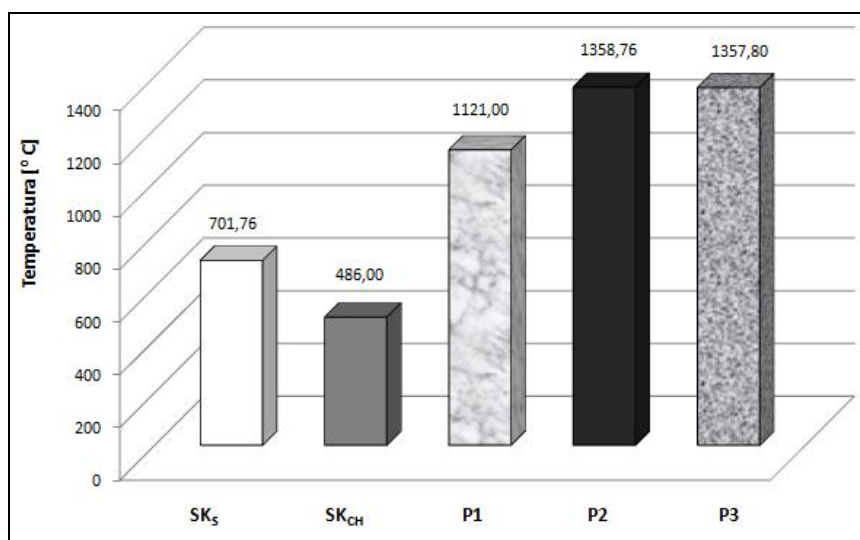
Wzrost temperatury w procesie AEDG może być następstwem wnikania do przedmiotu obrabianego dużego strumienia ciepła, pochodzącego od wyładowań iskrowych. Potwierdzeniem tego faktu jest wzrost energii wyładowań w procesie AEDG, który świadczy z kolei o większym udziale procesu erozji elektrycznej w usuwaniu nadmiaru obróbkowego oraz zmniejszeniu udziału energii skrawania ziarnami ściernymi CPS, co wykazali autorzy w pracy [3].

Przeprowadzono również pomiary temperatury szlifowania WW w procesach szlifowania elektroerozyjnego AEDG i szlifowania konwencjonalnego ściernicą diamentową. Wyniki pomiarów temperatury ściernicą diamentową przedstawiono na rysunku 4.

Porównanie tych wyników badań wskazuje, że wraz ze wzrostem napięcia i natężenia prądu generatora wyładowań ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ) zwiększa się temperatura procesu AEDG. Największe wartości temperatury uzyskano dla procesu realizowanego z dużymi i średnimi wartościami napięcia roboczego oraz natężenia prądu ( $P_2$ ,  $P_3$ ). Wartości temperatury były odpowiednio wyższe o około 18% w porównaniu do procesu realizowanego z małymi nastawami napięcia i natężenia prądu ( $P_1$ ) oraz o około 65% w porównaniu do procesu szlifowania konwencjonalnego z chłodzeniem dielektrykiem i około 48% w porównaniu do szlifowania konwencjonalnego realizowanego „na sucho”.

Podobnie jak w przypadku szlifowania ściernicą CBN, uzyskane temperatury w tym procesie były maksymalnymi wartościami średnimi, jakie można zmierzyć za pomocą termopary typu K. Utwierdza to w przekonaniu, że w procesie szlifowania AEDG wartości temperatury na styku ściernica-przedmiot obrabiany są znacznie

wyższe. Relatywnie wysokie wartości temperatury uzyskano także w procesie AEDG, realizowanym z małymi nastawami napięcia i natężenia prądu ( $P_1$ ). Wzrost temperatury szlifowania wynosił tu około 56%, w porównaniu do szlifowania konwencjonalnego z chłodzeniem.



Rys. 4. Porównanie wartości temperatury w strefie szlifowania ściernicą SD: SK<sub>S</sub>- szlifowanie konwencjonalne „na sucho”, SK<sub>CH</sub>- szlifowanie konwencjonalne z cieczą chłodzącą

W etapie drugim dokonano oceny stanu naprężeń własnych w warstwie wierzchniej stopu tytanu Ti6Al4V, ukształtowanej w procesie szlifowania konwencjonalnego i AEDG. Zakres prezentowanych badań obejmował ustalenie rozkładu naprężeń własnych WW próbek po szlifowaniu elektroerozyjnym i porównawczo próbek po szlifowaniu konwencjonalnym.

Pomiary naprężeń własnych w warstwie wierzchniej wykonano rentgenowską metodą dyfrakcyjną  $\sin^2\psi$ , która polega na określeniu rzeczywistych odkształceń sprężystych sieci krystalicznej szlifowanego stopu tytanu [6]. Przeprowadzono badania dla trzech zakresów parametrów elektrycznych generatora impulsów prądowych, ustalonych na podstawie wyników wcześniejszej pracy [3], oznaczonych kodowo: P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>. Zbiorcze zestawienie wyników pomiaru naprężeń własnych w WW, dla średniej grubości pomiarowej około 20  $\mu\text{m}$  przedstawiono w tab. 1.

Zasadniczy wpływ na kształtowanie stanu naprężeń własnych WW w procesie szlifowania stopu tytanu mają warunki obróbki i wynikający stąd mechanizm zdejmowania nadmiaru obróbkowego. Prezentowane wyniki badań (tab. 1) wskazują, że na wartość i rodzaj powstających naprężeń własnych WW stopu tytanu istotny wpływ wywiera temperatura w strefie obróbki. Badania wykazały, że realizacja

procesu szlifowania konwencjonalnego z chłodzeniem dielektrykiem, wytwarza składową tensora naprężeń o znaku ujemnym. Tę korzystną tendencję kształtowania naprężeń własnych obserwuje się również w procesie szlifowania AEDG. Zróżnicowanie wartości tych naprężeń zależy jednak od parametrów elektrycznych generatora w procesie AEDG.

Tabela 1. Porównanie wartości naprężeń własnych w procesie AEDG i konwencjonalnym

Realizowany proces	Wartości naprężeń $\sigma$ [MPa]
Szlifowanie konwencjonalne (SK <sub>CH</sub> )	-284.7
Szlifowanie AEDG P <sub>1</sub> (U=100V, I=8A)	-208.5
Szlifowanie AEDG P <sub>2</sub> (U=150V, I=12A)	-50.4
Szlifowanie AEDG P <sub>3</sub> (U=200V, I=25A)	181.6

Wyniki badań potwierdziły, że w procesie szlifowania AEDG stopu tytanu, realizowanego z udziałem średnich wartości napięcia i natężenia prądu (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>), powstają korzystne naprężenia ściskające. Stosowanie dużych wartości napięcia i natężenia prądu (P<sub>3</sub>) powoduje natomiast kształtowanie w WW naprężeń rozciągających, będącym następstwem termicznego oddziaływania wyładowań iskrowych. Przyczyną jest tu duża szybkość nagrzewania i studzenia warstwy wierzchniej w obszarze styku ściernica – przedmiot, która prowadzi do wzrostu naprężeń cieplnych i powoduje niekorzystny rozkład naprężeń własnych.

#### 4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania umożliwiły ustalenie wpływu warunków szlifowania na temperaturę WW w procesie elektroerozyjnego szlifowania (AEDG) stopu tytanu Ti6Al4V. Wyniki pomiarów potwierdziły, że wraz ze wzrostem parametrów elektrycznych generatora (napięcia i natężenia prądu) wzrasta temperatura w procesie szlifowania.

Badania ujawniły także istotny wpływ elektrycznych parametrów procesu AEDG (napięcia i natężenia prądu) na stan naprężeń własnych w WW. Wykazano, że realizacja procesu AEDG z dużymi wartościami napięcia i natężenia prądu (U=200V i I=25A) powoduje kształtowanie niekorzystnych naprężeń rozciągających w WW.

Celowym jest kontynuowanie prac nad doskonaleniem aparatury pomiarowej oraz prowadzenie dalszych badań w zakresie ustalania rozkładu temperatury szli-

fowania AEDG, mającej bezpośredni wpływ na tribologiczne właściwości warstwy wierzchniej kształtowanej w tym procesie.

#### LITERATURA

- [1] GOŁĄBCZAK A., ŚWIĘCIK R., *Badania wpływu wybranych warunków szlifowania AEDG stopu tytanu na temperaturę warstwy wierzchniej*, W: Obróbka Ściera Współczesne problemy, W. Barylski (red.), 2011, Gdańsk, 395–402.
- [2] GOŁĄBCZAK A., ŚWIĘCIK R., *Badania rozkładu temperatury w strefie elektroerozyjnego szlifowania (AEDG) stopu tytanu*, Inżynieria Maszyn, vol.16/3/2011, wydanie 2012, 40–47.
- [3] GOŁĄBCZAK A., ŚWIĘCIK 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, Chiny, 2010, 517–522.
- [4] 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.
- [5] OCZOŚ K., PORZYCKI J. *Szlifowanie*, WNT Warszawa, 1986.
- [6] SKRZYPEK S. J., *Makronapężenia własne cienkich warstw – pomiar metodą  $g\text{-sin}^2\Psi$  w nowej geometrii dyfrakcji przy stałym kącie padania*. Inżynieria powierzchni, 2(2001), 47–55.
- [7] ŚWIĘCIK R., *Wpływ warunków elektroerozyjnego szlifowania na przebieg procesu i wyniki obróbki*. Rozprawa doktorska, Łódź 2008.
- [8] WÓJCIK R.: *Stan warstwy wierzchniej w stopach tytanu w procesie szlifowania konwencjonalnego*. XXVII Szkoła Naukowa Obróbki Ściernej, Koszalin-Sarbinowo, 2004, 401–408.
- [9] YADAVA V., JAIN V. K., DIXIT M., *Parametric Study of Temperature Distribution in Electrodischarge Diamond Grinding*. Materials and Manufacturing Processes Vol. 19, no. 6, 2004, 1071–1101.