

Wojciech MUSIAŁ, Jarosław PLICHTA, Katarzyna MUSIAŁ
POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, KATEDRA INŻYNIERII PRODUKCJI

Analiza powierzchni ceramiki technicznej po precyzyjnym szlifowaniu z dosuwem nanometrycznym

Dr inż. Wojciech MUSIAŁ

W 2007 roku uzyskał stopień doktora na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej, w zakresie budowa i eksploatacja maszyn. Jego działalność dydaktyczna skupia się wokół programowania systemów obróbkowych CNC, zintegrowanych systemów CAD, CAM CAE, automatyzacji produkcji, programowania robotów przemysłowych i integracji wytwarzania CIM. Działalność naukowa ukierunkowana jest na zagadnienia związane z mikroobróbką, budową systemów sterowania w tym mikroszlifowania.

e-mail: wmusial@wp.pl



Mgr inż. Katarzyna MUSIAŁ

W roku 1997 ukończyła studia (specjalność Układy elektroniczne) z wynikiem bardzo dobrym. Od 1 października 1997 roku pracowała na stanowisku asystenta w Katedrze Inżynierii Komputerowej na Wydziale Elektroniki Politechniki Koszalińskiej. Obecnie jest doktorantką na wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej. Jej zainteresowania naukowe skupiają się wokół zagadnień sztucznej inteligencji, ze szczególnym uwzględnieniem systemów ekspertowych.

e-mail: wmusial@wp.pl



Prof. hab. dr inż. Jarosław PLICHTA

Od roku 2004 jest Kierownikiem Katedry Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Specjalizuje się w technologii budowy maszyn i automatyzacji procesów technologicznych oraz obróbce ścierniej z zastosowaniem narzędzi supertwardych. Jest kierownikiem Sekcji Obróbka Ścierna" Komisji Budowy Maszyn PAN Oddział w Poznaniu, a także członkiem Komitetu Redakcyjnego Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji.

e-mail: jaroslaw.plichta@tu.koszalin.pl



Streszczenie

W artykule przedstawiono charakterystyki powierzchni ceramiki technicznej, otrzymanych po szlifowaniu w warunkach plastycznego płynięcia materiału obrabianego. Badania przeprowadzono na stanowisku zaprojektowanym w celu mikroszlifowania z dosuwem nanometrycznym.

Słowa kluczowe: ceramika korundowa, plastyczne płynięcie, dosuw nanometryczny.

Analysis of industrial ceramics surface subjected to precise grinding with nanometric infeed

Abstract

The paper presents characteristics of geometric surface texture of industrial ceramics subjected to grinding under conditions of plastic material-removal. Investigations were carried out on the setup designed for microgrinding with nanometric feed-in.

Keywords: Alumina ceramics (Al_2O_3), ductile - regime grinding, nanometric infeed.

1. Wstęp

Proces szlifowania materiałów kruchych w warunkach plastycznego (ciągłego) usuwania materiału, jest stosunkowo nowym sposobem obróbki materiałów ceramicznych, wymagającym realizacji dosuwu z dokładnością nanometryczną. Umożliwia wypełnienie luki między klasycznym procesem szlifowania (z dokładnościami mikrometrycznymi najczęściej w warunkach kruchego pęknięcia materiału obrabianego) a procesem docierania i polerowania, dla których proces kruchego pęknięcia nie zachodzi, za to charakteryzują się małą wydajnością, przy czym proces szlifowania nie jest zdeterminowany wymiarowo. Wydaje się, że obróbka ta w warunkach ciągłego usuwania materiału, może zapewnić połączenie pozytywnych cech procesu szlifowania z pozytywnymi właściwościami procesu docierania i polerowania, szczególnie jeśli chodzi o osiągalne dokładności obróbki elementów ceramicznych [1, 2].

W celu przeprowadzenia procesu szlifowania oraz identyfikacji progów przejścia między kruchym a plastycznym mechanizmem usuwania materiału, zbudowano stanowisko badawcze, spełniające wymogi procesu szlifowania w warunkach ciągłego usuwania materiału. Zastosowano szybkoobrotowe elektrowrzeciona, charakteryzujące się wysoką sztywnością i precyzją wykonania. Skonstruowano i wykonano zespół dosuwu nanometrycznego, zapewniający realizację procesu szlifowania poniżej wartości progowej wnikania ziaren ściernych w materiał obrabiany. Dzięki temu możliwa była realizacja mechanizmu oddzielania materiału szlifowanego, przez plastyczne płynięcie przy znacznej redukcji mechanizmu kruchego pęknięcia [3].

2. Budowa stanowiska badawczego

W celu zapewnienia realizacji procesu szlifowania w warunkach plastycznego płynięcia materiału obrabianego dokonano analizy teoretycznej zagadnienia i na jej podstawie wytypowano cztery zasadnicze założenia, które należało spełnić, aby móc przystąpić do budowy stanowiska badawczego:

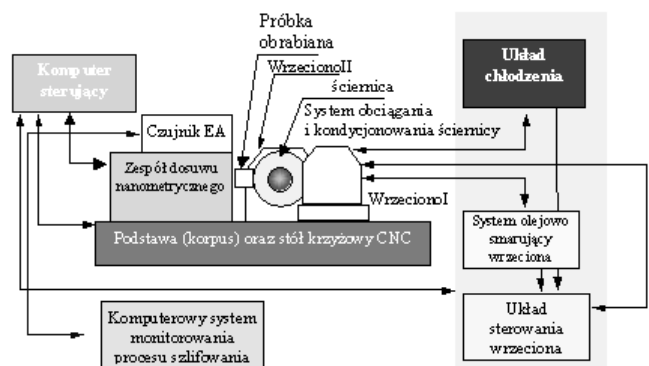
- minimalizacja dosuwu wglębnego zapewniająca wnikanie ziaren ściernych w materiał obrabiany poniżej wartości progowej, wyznaczającej przejście między kruchym a plastycznym mechanizmem usuwania materiału obrabianego (budowa zespołu dosuwu nanometrycznego);
- zapewnienie wysokiej sztywności korpusu nośnego wchodzącego w skład stanowiska badawczego oraz redukcja wiązań kinematycznych, zwiększająca odporność na zakłócenia termiczne oraz wibroakustyczne, a także zapewnienie efektywnego systemu kondycjonowania i obciążania narzędzia ściernego w celu umożliwienia redukcji błędów kształtu, i tym samym bicia ściernicy w procesie szlifowania;
- zapewnienie wysokiej szybkości obrotowej narzędzia ściernego, aby uzyskiwać znaczne prędkości szlifowania w celu redukcji przekroju warstwy skrawanej przypadającej na jeden obrót ściernicy;
- możliwość monitorowania procesu szlifowania za pomocą sygnału emisji akustycznej (EA) w celu identyfikacji mechanizmu kruchego pęknięcia w warstwie wierzchniej obrabianego materiału oraz plastycznego płynięcia w strefie szlifowania.

Na rysunku 1 przedstawiono widok ogólny stanowiska badawczego.

Należą do nich: korpus szlifierki (wysezonowany korpus żeliwny), stół krzyżowy CNC wraz z systemem sterowania, układ zasilania i sterowania wysoko obrotowymi elektrowrzecionami, układ smarowania i chłodzenia łożysk wysoko obrotowych, układ monitorowania procesu szlifowania z wykorzystaniem sygnału EA (rys. 2).



Rys. 1. Widok ogólny stanowiska badawczego
Fig. 1. General view of investigation setup

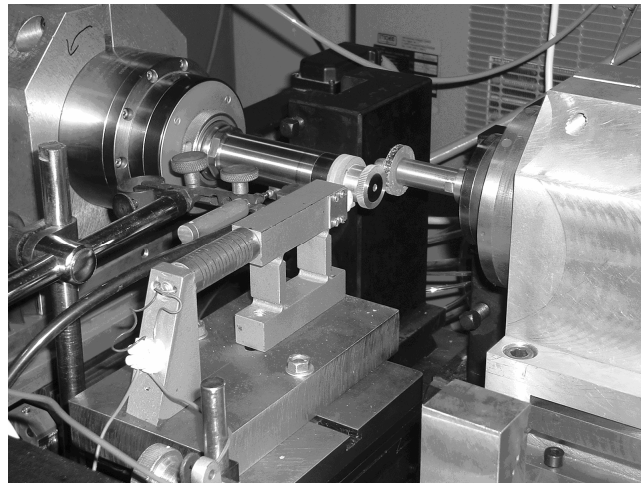
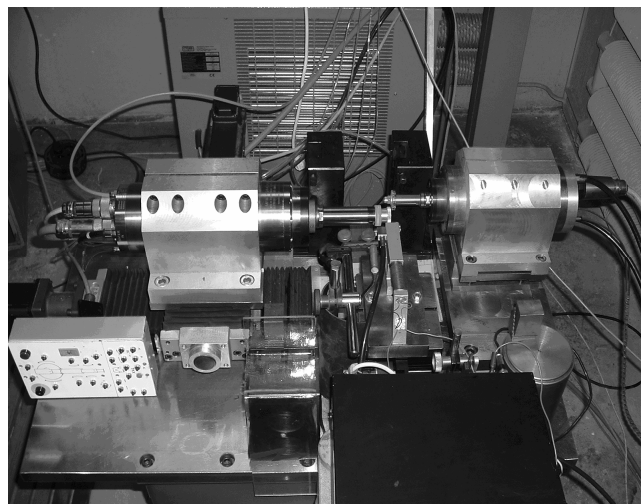


Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego
Fig. 2. Diagram of investigation setup

Ważnym elementem stanowiska badawczego, który zapewnia praktyczną realizację szlifowania w warunkach plastycznego płynięcia materiału obrabianego jest zespół dosuwu nanometrycznego (rys. 3).

Zespół dosuwu nanometrycznego (ZDN) został zaprojektowany w oparciu o siłownik piezoelektryczny, którego konstrukcja umożliwia bardzo precyzyjne pozycjonowanie wzdłuż osi wydłużenia stosu. Zespół ZDN charakteryzuje się prostą konstrukcją kinematyczną, ze względu na konieczność wyeliminowania zakłóceń powstających w trakcie generowania dosuwu. ZDN składa się z elementu belkowego, który ulega przesunięciu w zakresie odkształceń sprężystych zgodnie z kierunkiem i zwrotem wektora wydłużenia, oraz siłownika piezoelektrycznego. Aktuator piezo-

elektryczny jest głównym elementem zespołu dosuwu nanometrycznego, zapewniającym precyzyjne przemieszczenie belki dociskowej oraz uchwytu elementu obrabianego (znajdującego się na jej końcu) w kierunku powierzchni czynnej ściernicy. Stos piezoelektryczny jest rodzajem przetwornika, który przetwarza sygnał napięciowy na sygnał mechaniczny w postaci przesunięcia elementu belkowego. Stos piezoelektryczny ulega odkształceniu, wykorzystując odwrotne zjawisko piezoelektryczne, które polega na zmianie jego długości proporcjonalnie do zmian napięcia sterującego (od 0 do 30 μm zależy od przyrostu napięcia wejściowego, natomiast rozdzielczość pozycjonowania stosu piezoelektrycznego osiąga wartość około 5 nm) [6].



Rys. 3. Zespół dosuwu nanometrycznego
Fig. 3. Nanometric infeed system

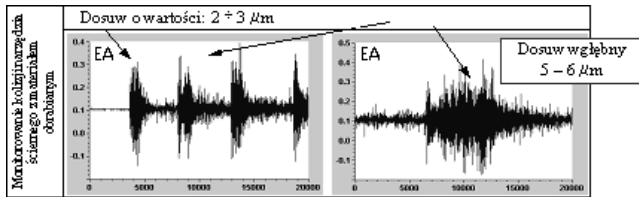
3. Metodyka badań

Badania doświadczalne przeprowadzono w dwóch etapach. W etapie pierwszym określano optymalne warunki obróbki ceramiki (Al_2O_3), przy zmiennej głębokości wnikania ziaren ściernych w obrabiany materiał (redukcji warstwy skrawanej przypadającej na jeden obrót ściernicy). W drugim etapie wykonano badania procesu szlifowania, polegające na określeniu progu przejścia między kruchym a plastycznym mechanizmem usuwania materiału, identyfikując zmianę wartości sygnału EA i porównując występowanie defektów na powierzchni i w warstwie wierzchniej obrabianego materiału, dla badanych parametrów obróbki.

Badano również warunki obciążania i kondycjonowania ściernicy diamentowej, użytej w procesie szlifowania w warunkach plastycznego płynięcia materiału obrabianego. Ze względu na

specyfikę procesu szlifowania ceramiki technicznej, która podatna jest na propagację kruchego pęknięcia, stan powierzchni czynnej narzędzia miał duży wpływ na jakość otrzymywanych powierzchni, a co za tym idzie na intensywność defektów w warstwie wierzchniej obrabianego materiału

Defekty powstające w pierwszej fazie kontaktu ziaren ściernych z materiałem obrabianym, mogą sięgać głęboko w warstwę wierzchnią ceramiki. Defekty te mogą być trudne do usunięcia, nawet w kolejnych etapach obróbki. Dlatego w realizacji procesu szlifowania, zastosowano monitorowanie z wykorzystaniem sygnału EA, na etapie zbliżania ziaren ściernych do materiału obrabianego (rys. 4).



Rys. 4. Identyfikacja kontaktu ziaren ściernych z materiałem obrabianym (sygnał EA)

Fig. 4. Identification of abrasive grains - material contact (EA signal)

Monitorowanie kontaktu ziaren ściernych z materiałem obrabianym, wskazane jest ze względu na konieczność stosowania w realizowanych badaniach dwuetapowego dosuwu: zgrubnego za pomocą stołu CNC (który umożliwia pozycjonowanie z dokładnością do $2\div 3\ \mu\text{m}$) oraz precyzyjnego, pozwalającego na realizację dosuwu z dokładnością do kilku nanometrów. Z tego względu, każde badanie poprzedzał szybki dojazd wrzeciona do punktu referencyjnego ustalonego w obszarze roboczym szlifierki, a następnie roboczy posuw o wartości $3,05\ \text{mm/min}$ w kierunku próbki, przy czym kolejne dosunięcia ściernicy wykonywano skokowo od 50 do $60\ \mu\text{m}$, kontrolując wskazania enkodera serwonapędu stołu CNC. Po wykonaniu 5 cykli zbliżających ściernicę do próbki (sumaryczne przesunięcie $300\ \mu\text{m}$), ostatni etap zbliżania ściernicy do próbki obrabianej, monitorowano po każdym zainicjowaniu dosuwu o wartość około $2\ \mu\text{m}$.

Podział podejścia ściernicy do materiału obrabianego na trzy etapy, wynikał z niedokładności mocowania próbki i konieczności ograniczenia głębokości wnikania ziaren ściernych w początkowej fazie szlifowania. Zastosowanie sygnału EA, w drugim i trzecim etapie zbliżania ściernicy do materiału obrabianego, pozwalało na precyzyjne określenie pozycji, od której mógł być rozpoczęty etap mikroszlifowania z wykorzystaniem siłownika piezoelektrycznego. Po zbliżeniu ściernicy do próbki i wykonaniu kilku cykli szlifowania zgrubnego (dosuw $2\div 3\ \mu\text{m}$), następowało blokowanie ruchu stołu CNC. Od tego momentu realizowano szlifowanie z wykorzystaniem zespołu dosuwu manometrycznego.

4. Analiza wyników badań

Zgodnie z przyjętą metodyką badań, zrealizowano serię prób procesu mikroszlifowania w warunkach plastycznego płynięcia materiału obrabianego. W jego wyniku uzyskano próbki powierzchni materiału szlifowanego (korundu spiekanego o wysokiej zawartości Al_2O_3 99,7% – producent Boguchwała Cerel). Badania zrealizowano dla zmiennych parametrów szlifowania, uzyskując powierzchnie charakteryzujące się odmienną jakością.

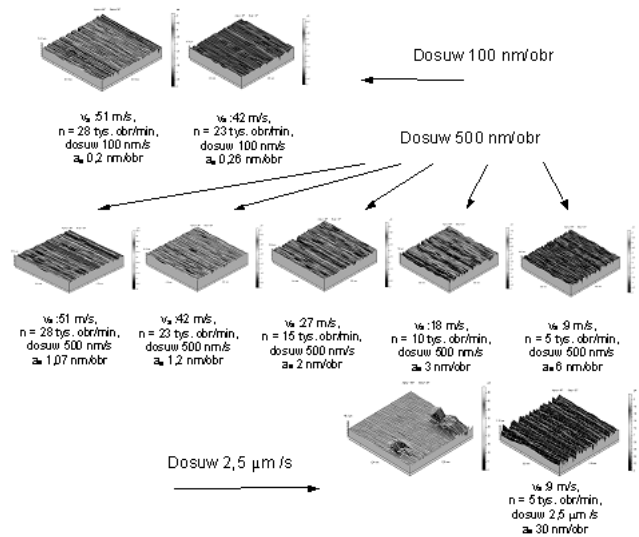
Powierzchnie uzyskane w procesie szlifowania poddano analizie za pomocą profilometru HOMMEL - TESTER T8000, wyposażonego w głowicę pomiarową typu Waveline 60 Basic. Do analizy topografii powierzchni wykorzystano oprogramowanie MountainsMap Universal 3.1.0 (Digital Surf).

W wyniku przeprowadzonych analiz, uzyskano informacje o parametrach opisujących w sposób jakościowy i ilościowy stan powierzchni obrobionych. Otrzymano również dane o występowaniu defektów na powierzchni materiału szlifowanego (obrazy

3D). W realizowanych badaniach analizowano parametry: R_a , R_z , a także parametry opisujące topografię powierzchni oraz parametry objętościowe [5]. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki zbiorczego porównania analizowanych powierzchni, zgodnie z przyjętą metodyką badań.

W wyniku zmiany warstwy skrawanej przypadającej na jeden obrót ściernicy, na powierzchniach obrabianych obserwowano odpowiednie zmiany jakości powierzchni.

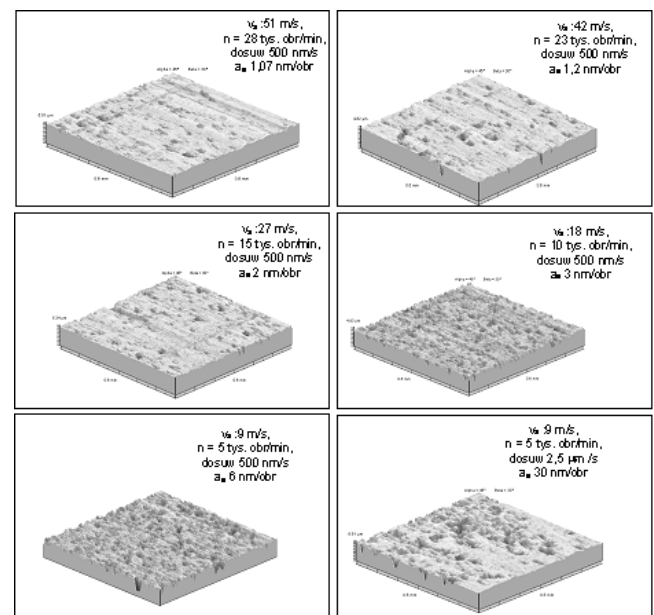
Głównym celem przeprowadzanych analiz warstwy wierzchniej obrabianego materiału ceramicznego, było określenie zmian jakości powierzchni, na skutek zmiany mechanizmu usuwania materiału obrabianego w strefie szlifowania (kruchy/plastyczny) [4, 7].



Rys. 5. Topografie powierzchni szlifowanej uzyskane przy zmiennych parametrach obróbki

Fig. 5. Topographies of cut surfaces obtained for changeable machining parameters

Na rysunku 6 przedstawiono powierzchnie 3D, które stanowią cyfrowe projekcje powierzchni obrabianej (opcja wizualizacja fotograficzna). Powierzchnia obrabiana charakteryzuje się znacznym zróżnicowaniem dla parametrów obróbki z przedziału od 5 tys. obr./min do 23 tys. obr./min.

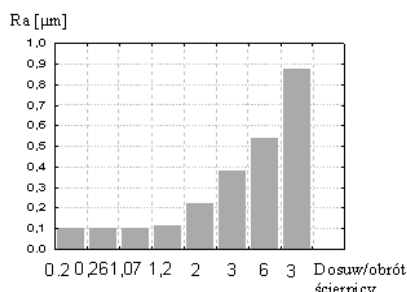


Rys. 6. Porównanie topografii powierzchni szlifowanych

Fig. 6. Comparison of cut surfaces' topographies

W przedziale od 23 tys. obr./min do 28 tys. obr./min, powierzchnie wykazują równoważne walory jakościowe, podobnie jak to wykazała analiza obrazów skaningowych.

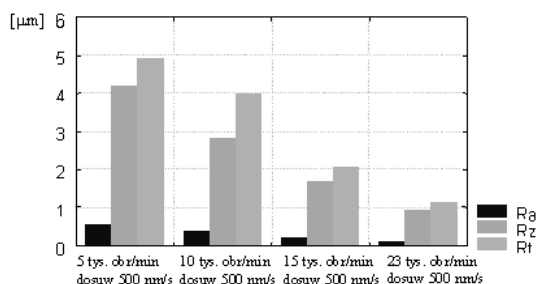
Analiza tych powierzchni wykazała, że wraz ze zmniejszeniem grubości warstwy skrawanej, poprawie ulega wartość chropowatość powierzchni. Analiza parametru R_a powierzchni, uzyskanych przy szybkości obrotowej ściernicy w przedziale: 28 - 23 tys. obr./min, wykazała brak znaczącej różnicy między analizowanymi powierzchniami, dla dosuwu mieszającego się w przedziale: 100 nm/s lub 500 nm/s (rys. 7).



Rys. 7. Średnie wartości parametru R_a uzyskane dla zmiennych wartości warstwy skrawanej

Fig. 7. Average values of R_a parameter obtained for changeable values of machined layer

Wraz z parametrem R_a analizowano R_t oraz R_z powierzchni obrabianej. Na rysunku 8 przedstawiono wpływ zmiany parametrów szlifowania na wartość parametrów chropowatości powierzchni.



Rys. 8. Wpływ grubości warstwy skrawanej przypadającej na jeden obrót ściernicy na wartości parametru R_a , R_z , i R_t

Fig. 8. Influence of machined layer thickness fallen on one turn of abrasive wheel regard R_a , R_z , and R_t parameters

Przeprowadzone badania wskazują, że wraz ze wzrostem prędkości szlifowania, ulega zmniejszeniu również wartość parametru S_a . Dla warstwy skrawanej wynoszącej około 1 nm/obr. ściernicy, parametr S_a ustala się na wartości bliskiej 0,2 μm . Wraz ze wzrostem grubości warstwy skrawanej następuje wzrost wartości parametru S_a , który dla warstwy skrawanej wynoszącej 6 nm/obr. ściernicy osiąga wartość ponad 0,6 μm . Analiza parametru S_a dla szybkości obrotowej ściernicy, wynoszącej odpowiednio 28 tys. obr./min (0,2 nm/obr. ściernicy dla dosuwu 100 nm/s) oraz 23 tys. obr./min (0,26 nm/obr. ściernicy przy dosuwie 100 nm/s) oraz 500 nm/s (1,07 nm/obr. ściernicy, a także 1,2 nm/obr. ściernicy) wykazała brak znaczących zmian.

5. Podsumowanie

Porównanie obrazów cyfrowych analizowanych powierzchni pozwala na wyciągnięcie wniosku, że różnią się one przede wszystkim chropowatością i porowatością. Dla powierzchni uzyskanych przy niższych szybkościach obrotowych, widoczne są ubytki warstwy przypowierzchniowej materiału obrabianego. Próbkę wykazują większą porowatość, w porównaniu z powierzchniami uzyskanymi przy wyższych prędkościach szlifowa-

nia (mniejsza warstwa skrawana przypadająca na jeden obrót ściernicy). Dla powierzchni uzyskanej przy nastawach parametrów obróbkowych: 5 tys. obr./min i dosuwie wgłębnym wynoszącym 2,5 $\mu\text{m/s}$, defekty na powierzchni charakteryzują się dużą głębokością i znaczną porowatością struktury przypowierzchniowej obrabianego materiału. Powierzchnie ukształtowane z parametrami w przedziale 23 – 28 tys. obr./min (i dosuwie 500 nm/s oraz 100 nm/s) odznaczają się największym wygładzeniem, choć i w tym przypadku występują defekty ujawniające się na powierzchni.

Analiza topografii powierzchni uzyskanych w procesie szlifowania, przy małych głębokościach wnikania ziaren ściernych w obrabiany materiał wskazuje, że charakteryzują się one ograniczoną okresowością, o czym świadczy jednostronny krótkofalowy charakter zanikania funkcji autokorelacji.

Dla powierzchni otrzymanych przy dosuwach (500 nm/s i 2,5 $\mu\text{m/s}$) oraz prędkości obrotowej ściernicy 10 i 5 tys. obr./min, nie obserwowano defragmentacji materiału obrabianego, jednak wartość parametru S_k wzrastała powyżej 1 μm wraz ze wzrostem S_{vk} od 1,5 do prawie 2 μm . Natomiast dla powierzchni o mniejszym zdeformowaniu, parametr S_{vk} przyjmował wartości zbliżone do S_k .

Anizotropowość powierzchni, charakterystyczna dla szlifowania z dużą głębokością wnikania ziaren ściernych w obrabiany materiał, jest ograniczona w realizowanym procesie szlifowania. W tym przypadku nanometryczny dosuw oraz duża prędkość szlifowania, zmniejsza grubość warstwy skrawanej przypadającej na jeden obrót ściernicy. To w konsekwencji powoduje zagłębienie się wierzchołków ziaren ściernych w obrabiany materiał znacznie poniżej 1 μm .

Stosunkowo duże wartości parametrów amplitudowych analizowanej powierzchni, są konsekwencją porowatej struktury szlifowanej ceramiki. Podczas szlifowania, struktura warstwy przypowierzchniowej materiału obrabianego ulegała otworzeniu (szczególnie dla małych prędkości szlifowania). Na powierzchni obrabianej tworzyły się przypadkowo rozłożone, głębokie pojedyncze wgłębienia, z reguły o małych objętościach. Dla powierzchni wykazujących większą liczbę defektów w warstwie przypowierzchniowej, zwiększała się objętość materiału w pustkach (S_{mr}), w porównaniu z powierzchniami uzyskanymi dla większych prędkości szlifowania. Taka struktura powierzchni wpływa na kształt krzywej nośności.

6. Literatura

- [1] T.G. Bifano, P.A. Bierden: Fixed – abrasive grinding of brittle hard – disk substrates. *Int. Mach Tools Manufact*, vol. 37, no 7, 1997, 935 – 946.
- [2] T.G. Bifano: *Ductile – Regime Grinding of Brittle Materials*. PhD Thesis, NC State University, Raleigh, NC, 1988.
- [3] S. Chandrasekar, G. Sathyanarayanan: An Investigation into the Mechanics of Diamond Grinding of Brittle Materials. 15th North American Manufacturing Research Conference Proceedings, vol. 2, Manufacturing Technology Review, 1987, 499 – 505.
- [4] K.E. Ocoś: Obróbka użytkowa ceramiki technicznej. Cz. 1. Istota, znaczenie i zastosowanie ceramiki technicznej. *Mechanik* nr 1, 1993, 5-13.
- [5] K.E. Ocoś, V. Liubimov: Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowanych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2003.
- [6] H. Van Brussel, D. Reynaerts, P. Vanherck, M. Versteyhe, S. Devos: A Nanometre-Precision, Ultra-Stiff Piezostepper Stage for ELID Grinding. *Annals of the CIRP*, vol. 52, no1, 2003.