

METODY OPISU TOPOGRAFII POWIERZCHNI ŚCIERNIC

Anna BAZAN¹, Andrzej KAWALEC²

Streszczenie: W artykule przedstawiono najczęściej wykorzystywane metody pomiaru topografii czynnej powierzchni ściernicy, zaznaczając jakiego rodzaju informacji dostarczają oraz jakie są ich ograniczenia. Ponadto zestawiono parametry powszechnie stosowane do opisu i analizy topografii ściernicy, uwzględniając jakie cechy ściernicy mogą być za ich pomocą charakteryzowane.

Słowa kluczowe: topografia ściernicy, pomiary topografii powierzchni, parametry topografii powierzchni

Summary: The paper presents the most common measurement techniques for grinding wheel surface, pointing out what kind of information they bring and what their limitations are. Also parameters used to describe and analyze grinding wheel topography, including features they can characterize, were presented.

Key words: grinding wheel topography, surface topography measurements, surface topography parameters

1. WPROWADZENIE

Topografia ściernicy jest zdeteminowana głównie przez procesy jej wytwarzania, uwzględniające m.in. ziarna ścierne, spoiwo oraz pory, oraz przygotowania do pracy. Należy uwzględnić m.in. czynniki związane z budową ściernicy, takie jak rozmiar, kształt, koncentracja i rozmieszczenie ziaren ściernych oraz proces zużywania ściernicy. Proces ten obejmuje m.in. zużycie ściernych ziaren, pękanie ziaren oraz wykruszanie mostków spoiwa [24]. Topografia ściernicy oraz parametry procesu szlifowania wpływają na kinematyczne interakcje pomiędzy ściernicą a szlifowanym przedmiotem. Mają one zatem znaczący wpływ na przebieg procesu szlifowania (wartości sił skrawania, mocy szlifowania oraz temperatury w strefie skrawania) oraz na jakość szlifowanej powierzchni. Szczegółowa wiedza na temat topografii ściernicy może być przydatna do lepszego poznania możliwości skrawnych ściernicy oraz pozwolić na wnikliwszą analizę procesu szlifowania.

2. METODY POMIARU TOPOGRAFII ŚCIERNICY

Pomiar topografii ściernicy nie jest łatwy ze względu na możliwe duże różnice wysokości na powierzchni oraz to, że ściernica zbudowana jest z różnych materiałów, o różnych właściwościach. Duże gabaryty ściernic oraz ich właściwości materiałowe wymuszają niekiedy konieczność stosowania w pomiarach ich replik [8, 26].

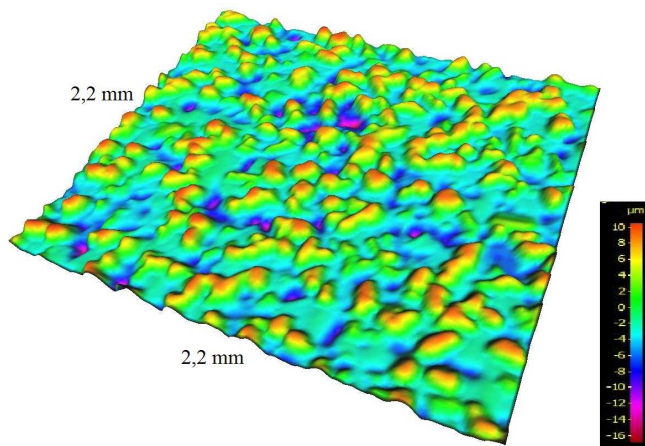
Metody oceny mikrogeometrii ściernicy można podzielić na metody statyczne (off-line) oraz metody dynamiczne (on-line). Do metod statycznych zalicza się metody profilometryczne stykowe, badania z wykorzystaniem mikroskopów optycznych, mikroskopów elektronowych, systemów wizyjnych, metodę zadrapań (*scratch*),

¹ Politechnika Rzeszowska, abazan@prz.edu.pl

² ak@prz.edu.pl

metodę odcisków (*imprint*) oraz skaterometrię [3, 27]. Do metod dynamicznych zalicza się m.in. metody wykorzystujące emisję akustyczną, pomiar sił i mocy skrawania lub metody pneumatyczne [2, 25]. Każda z metod ma swoje zalety oraz ograniczenia związane z rozdzielczością pionową i poziomą, łatwością zastosowania, analizą danych pomiarowych i ich interpretacją [25]. Metody statyczne dają możliwość uzyskania większej ilości informacji o topografii ściernicy, a także charakteryzują się większą dokładnością, dlatego też wybrane z nich zostaną szerzej omówione w dalszej części artykułu.

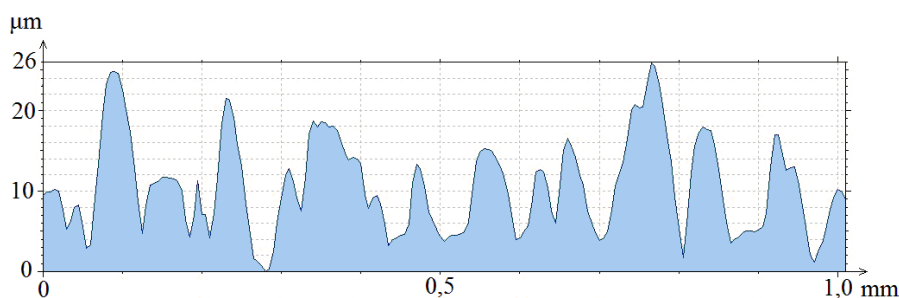
Metody stykowe są najdłużej i najczęściej stosowanymi metodami w pomiarach struktury geometrycznej powierzchni (SGP). Są opisane w normach, co także wpływa na ich popularność. Dzięki znacznemu wzrostowi mocy obliczeniowej techniki komputerowej od początku lat 90-tych XX w. w pomiarach stereometrii powierzchni stosuje się profilometrię 3D. W odróżnieniu od pomiarów 2D, pomiary 3D dostarczają większej ilości informacji, przez co dają pełniejszy obraz powierzchni. W efekcie umożliwiają one jej lepszą charakterystykę [6, 27] Na rys. 1 pokazano przykładowy obraz zmierzonej topografii 3D czynnej powierzchni ściernicy (CPS).



Rys. 1. Topografia ściernicy z CBN ze spoiwem galwanicznym o ziarnistości B25; promień końcówki pomiarowej 2 μm , krok próbkowania w osiach X i Y 5 μm

Wady metod stykowych przy pomiarach ściernic wynikają z faktu, że zmierzony profil (rys. 2) jest wynikiem koincydencji profilu rzeczywistego oraz kształtu końcówki pomiarowej. Końcówka pomiarowa działa jak filtr geometryczny, przez co ostre krawędzie ziaren ściernych oraz "poszarpane" wierzchołki ziaren – np. na skutek mikrowykruszeń – mogą nie zostać odwzorowane z wymaganą dokładnością [25]. Ponadto, przy dużych wysokościach nierówności na ściernicy i ich bardzo stromych zboczach może się pojawić problem z prawidłowym przemieszaniem się końcówki wzdłuż profilu. Końcówka po osiągnięciu minimum wgłębienia może odrywać się od

powierzchni przy próbie pokonania zbrocza wzniesienia lub zostać całkowicie przez nie zablokowana. Cai [8] zwraca również uwagę na problem szybkiego zużywania się ostrza końcówki pomiarowej podczas pomiarów ściernic z materiałów supertwardych. Pomiary stykowe CPS wykorzystano m.in. w pracach [5, 7, 18, 21, 26].



Rys. 2. Profil ściernicy z CBN ze spoiwem galwanicznym o ziarnistości B25;
promień końcówki pomiarowej 2 μm , krok próbkowania 5 μm

Metody optyczne pomiaru zyskują zwolenników m.in. dzięki temu, że są szybkie, bezstykowe i dają możliwość uzyskania większej rozdzielczości niż pomiary stykowe.

Do pomiarów CPS często wykorzystywane są mikroskopy konfokalne [11, 12, 15, 20, 22] oraz interferometry [8, 11, 17, 35].

W mikroskopach konfokalnych powierzchnia skanowana jest przez zogniskowaną na niej wiązkę światła. Światło skierowane na powierzchnię odbija się od niej, powraca przez obiektyw i kierowane jest na detektory fotoelektryczne, połączone z układem analizującym obraz [31]. Z kolei podczas pomiarów interferometrycznych nierówności powierzchni analizowane są na podstawie rozmieszczenia i deformacji prążków interferencyjnych [27].

Tak mikroskopy konfokalne, jak i interferometry są wrażliwe na kąt pochylenia nierówności, a jego dopuszczalna wartość zależy od konstrukcji urządzenia oraz zdolności powierzchni do rozpraszania światła [34]. Z tego powodu strome zbrocza ziaren ściernych mogą nie zostać odwzorowane [8, 12]. Możliwości pomiarowe omawianych narzędzi uzależnione są od właściwości optycznych mierzonych powierzchni, np. dla interferometrów ich stosowanie ograniczone jest do powierzchni o refleksyjności większej niż 15% [6]. Ponadto, wyniki pomiarów metodami optycznymi często są obciążone szumem, który należy odfiltrować w celu poprawnej analizy topografii CPS [8, 12].

Pomiary stykowe i ww. metody optyczne pozwalają uzyskać dane pomiarowe 3D. Umożliwia to m.in. wykorzystanie do opisu topografii ściernic parametrów SGP przedstawionych w kolejnej części artykułu. Nie dają one jednak bezpośrednio informacji gdzie przebiega granica rozdziału pomiędzy ziarnem a spoiwem.

Do tworzenia dwuwymiarowych obrazów CPS w celu uzupełnienia pomiarów 3D wykorzystuje się mikroskopy optyczne (np. stereoskopowe) [4, 9, 10] lub mikroskopy elektronowe SEM [9, 16, 17, 19, 26, 28]. Zaletami SEM w tym przypadku są: wysoka rozdzielczość, duża głębokość ostrości, możliwość płynnej zmiany powiększenia, szybkiego skanowania dużych powierzchni oraz prowadzenie analizy pierwiastkowej materiałów przy pomocy mikroanalizatora rentgenowskiego dyspersji energii, sprzężonego z mikroskopem [19]. Obrazy z SEM wykorzystywane są najczęściej do wizualnej oceny CPS, w tym do oceny liczby, kształtu, rozmieszczenia oraz osadzenia ziaren w spoiwie, określenia form zużycia ziaren i osnowy, obserwacji zalepień oraz zliczania ziaren, które uległy poszczególnym rodzajom zużycia [9, 26, 28]. Stosując metody analizy obrazu można wyznaczyć i zliczyć wierzchołki ziaren ściernych, określić odległości między ziarnami, wyznaczyć takie parametry ziaren ściernych oraz zalepień, jak np. pole ich powierzchni oraz procentowy udział ich powierzchni w całym obszarze obrazu [17, 19]. Wadą SEM jest stosunkowo mała przestrzeń pomiarowa, przez co większe ściernice muszą być pocięte na mniejsze fragmenty lub ich topografia musi być odwzorowana za pomocą replik.

3. PARAMETRY WYKORZYSTYWANE DO OCENY CPS

Trudności związane z opisem topografii CPS związane są z występowaniem na niej bardzo dużej liczby ostrzy skrawających o niezdefiniowanej geometrii oraz losowym rozmieszczeniu. Stąd rodzi się konieczność charakteryzowania topografii ściernicy oraz jej właściwości skrawnych za pomocą parametrów statystycznych. Parametry te powinny zarówno charakteryzować ściernicę jak i korelować z jej właściwościami użytkowymi [26].

Verker w raporcie CIRP wskazuje, że na pojedynczym ziarnie można wyróżnić wiele ostrzy skrawających, stąd zaproponował parametry C odnoszące się do ostrzy skrawających (*Cutting edges*) i parametry G (*Grains*) odnoszące się do ziaren ściernych [33]. Zarówno dla ostrzy skrawających, jak i dla ziaren ściernych wyróżnił (tab. 1) parametry liniowe 2D (indeks dolny L – *Linear*) i odpowiadające im parametry powierzchniowe 3D (indeks dolny A – *Areal*). Zarówno ostrza skrawające jak i ziarna ściernie raport klasyfikuje jako statyczne, dynamiczne lub kinematyczne (indeksy dolne odpowiednio: *stat*, *dyn*, *kin*). Ostrza i ziarna statyczne są to wszystkie ostrza i ziarna, które występują na powierzchni ściernicy. Niektóre ziarna statyczne nie biorą jednak udziału w procesie skrawania. Ostrza i ziarna położone niżej niż pozostałe przy określonej głębokości skrawania nie będą pracowały. Takie ziarna i ostrza nie są ujęte przez parametry C_{dyn} i G_{dyn} . Podobnie nie wszystkie ostrza na tym samym poziomie będą skrawały, ponieważ mogą być one umiejscowione w tzw. cieniu kinematycznym, czyli za ostrzem, które wcześniej zebrało już materiał. Zatem parametry C_{kin} i G_{kin} uwzględniają tylko te ostrza i ziarna, które nie znajdują się w cieniu kinematycznym.

Tab. 1. Parametry opisujące topografię powierzchni ściernicy

	Ostrza skrawające	Ziarna skrawające
Parametry liniowe [1/mm]	C_{Lstat}	G_{Lstat}
	C_{Ldyn}	G_{Ldyn}
	C_{Lkin}	G_{Lkin}
Parametry powierzchniowe [1/mm ²]	C_{Astat}	G_{Astat}
	C_{Adyn}	G_{Adyn}
	C_{Akin}	G_{Akin}

Blunt [5] zaproponował parametr Sds (gęstość wzniesień profilu) jako liczbę statycznych ostrzy skrawających przypadającą na jednostkę powierzchni. Przy obliczaniu parametru Sds wzniesienie jest definiowane jako punkt w prostokątnej siatce punktów pomiarowych, który jest wyższy od swoich ośmiu najbliższych sąsiadów. Taki sposób określania wzniesień daje możliwość łatwego ich zliczania. Niestety, jego wadą jest to, że punkty oddalone od siebie o 2 jednostki kroku próbkowania, których różnica wysokości będzie większa od rozdzielczości pionowej narzędzia pomiarowego będą interpretowane jako dwa wzniesienia, podczas gdy najprawdopodobniej pracują one jako jedno ostrze skrawające. Stąd wniosek, że rozsądniej jest traktować wszystkie wzniesienia na ziarnie skrawającym jako jedno ostrze, czyli wyznaczać liczbę ziaren aktywnych niż liczbę wzniesień. Wykorzystując fakt, że parametr Sds jest bardzo mocno zależny od kroku próbkowania (rys. 3) Blunt określił na podstawie badań doświadczalnych, że w celu pomiaru gęstości ziaren aktywnych optymalny krok próbkowania ss_{opt} powinien spełniać zależność:

$$\frac{d_g}{4} \leq ss_{opt} \leq \frac{d_g}{3} \quad (1)$$

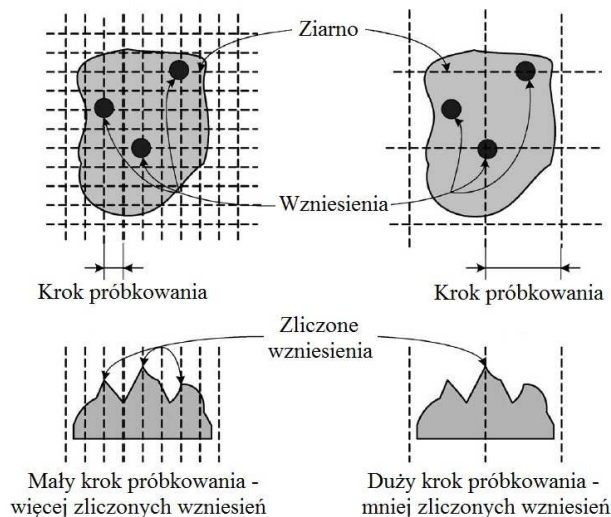
gdzie d_g jest średnią średnicą ziarna.

Zależność (1) nie bierze pod uwagę nierównomierności rozkładu ziaren na powierzchni ściernicy oraz różnej wielkości ziaren. Z tych powodów autorzy artykułu [26] zaproponowali określanie optymalnego kroku próbkowania ss_{opt} na podstawie parametru Sal (poziomej odległości funkcji autokorelacji), który uwzględnia stochastyczną naturę topografii ściernicy. Autorzy sformułowali nierówności postaci:

$$\frac{Sal}{4} \leq ss_{opt} \leq \frac{Sal}{3} \quad (2)$$

Autorzy prac [7, 26] poza wspomnianym wyżej parametrem Sds , który interpretują jako gęstość ostrzy skrawających lub gęstość ziaren, wykorzystują do opisu topografii powierzchni ściernic również parametry Ssc (średnia krzywizna wierzchołków) oraz

Sq (średniokwadratowa wysokość powierzchni). Wskazują oni, że parametr Ssc dostarcza informacji o ostrości ziaren, natomiast Sq o wielkości ziaren – jednak tylko w sposób orientacyjny.



Rys. 3. Wpływ kroku próbkowania na liczbę zliczonych wzniesień [wg 26]

Kapłonek [20] zwraca uwagę na wrażliwość parametru Sds na rozdzielczość pionową pomiaru. Przy rozdzielczości $0,01 \mu\text{m}$ wartość parametru Sds analizowanej ściernicy była dwukrotnie większa niż przy rozdzielczości $15 \mu\text{m}$.

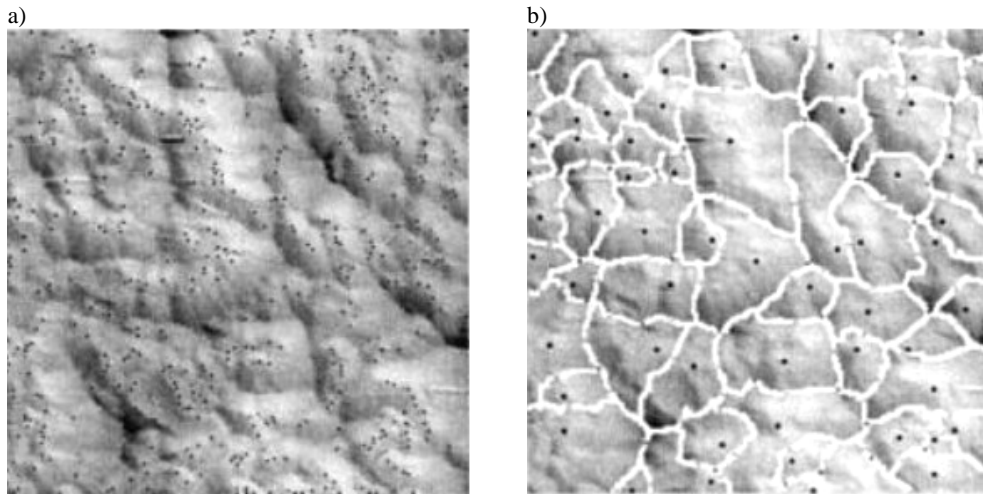
Scott [29] w celu wyznaczenia ziaren ściernych na podstawie danych pomiarowych topografii ściernicy proponuje wykorzystanie tzw. filtracji Wolfa (ang. *Wolf pruning*). Eliminuje się w ten sposób wierzchołki i punkty siodłowe o niewielkiej różnicy wysokości, określonej w stosunku do maksymalnej wysokości powierzchni. Autor określił, że metoda ta daje poprawne wyniki niezależnie od wielkości ziarna przy progu przepuszczalności 5% (rys. 4). Metodę tę stosowano m.in. w pracy [12].

Autorzy pracy [35] proponują uproszczenie kształtu ziarna do stożka o zaokrąglonym wierzchołku (rys. 5). Wtedy parametr Sdq (średniokwadratowy gradient powierzchni) mógłby służyć do wyznaczenia średniego kąta stożka θ ze wzoru:

$$\theta = \pi - 2 \cdot Sdq \quad (3)$$

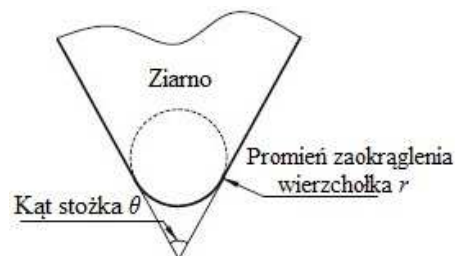
Średni promień ziarna R można zaś wyrazić wzorem:

$$R = 1/Ssc \quad (4)$$



Rys. 4. Topografia ściernicy o wymiarach 0,5 x 0,5 mm a) pierwotne punkty krytyczne, b) oddzielenie ziaren po filtracji Wolfa na poziomie 5% [29]

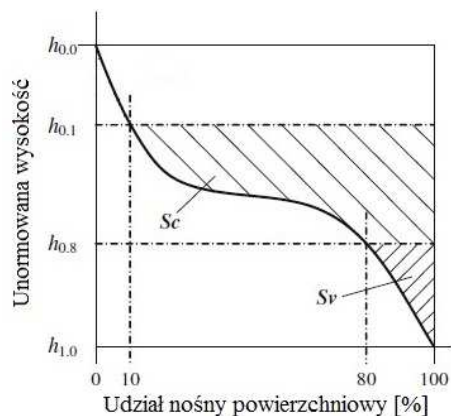
Autorzy pracy [35] ocenili objętość przestrzeni, w której na powierzchni ściernicy mogą gromadzić się wióry jako sumę parametrów S_c (objętość pustek w strefie rdzenia) oraz S_v (objętość pustek w strefie wgłębień) (rys. 6).



Rys. 5. Uproszczona geometria ziarna [wg 35]

Kapłonek [18, 21] wskazuje na przydatność do oceny powierzchni ściernic pod kątem ich zalepiania takich parametrów SGP jak S_{bi} (wskaźnik nośności powierzchni), S_{dr} (współczynnik rozwinięcia powierzchni) oraz S_k (wysokość rdzenia powierzchni)

W pracy [23] wykazano, że wzrost wartości parametrów krzywej udziału materiałowego w układzie 2D, takich jak R_{pk} (zredukowana wysokość wzniesień) oraz R_k (głębokość rdzenia chropowatości), może być miarą stopnia zużycia ściernic. Rozważając przebieg zmienności tych parametrów autorzy wnioskuje również o charakterze zużycia badanych narzędzi.



Rys. 6. Krzywa nośności stereometrii powierzchni [wg 35]

W artykułach [13, 14, 17] zaznaczono, iż przy analizie topografii narzędzi ściernych szczególną uwagę należy zwrócić na cechy wyniesień wierzchołków ziaren ponad płaszczyznę położoną na poziomach od 0,1 do 0,4 wartości parametru St od najwyższego wierzchołka powierzchni. Analiza wyniesień opiera się m.in. na takich parametrach jak: powierzchnia podstawy wyniesienia (wyspy), liczba wysp, wysokość i rozproszenie wysokości wierzchołków wyniesień oraz średnia odległość między wierzchołkami wyniesień. Istotna jest również zmienność parametrów opisujących wyniesienia w funkcji położenia płaszczyzny odcinającej. W celu wyznaczenia odległości pomiędzy wierzchołkami autorzy stosują dekompozycję powierzchni narzędzia ściernego z wykorzystaniem komórek Voronoi.

Autorzy prac [1, 30] określają mikrogeometrię powierzchni ściernicy w oparciu o parametry 2D profilu chropowatości. Parametry wysokościowe Ra (średnia arytmetyczna rzędnych profilu), Rz (wysokość chropowatości wg 10 punktów), Rm (całkowita wysokość profilu) charakteryzują wysokość wzniesień na ściernicy, parametry horyzontalne S (średni odstęp miejscowych wzniesień profilu) oraz Sm (średnia szerokość rowków) informują o odległości między wzniesieniami. Parametry rs (średni promień wierzchołków), Δa (średnie arytmetyczne pochylenie profilu) oraz Δq (średnie kwadratowe pochylenie profilu) opisują kształt ziaren ściernych.

W artykułach [24, 32] przedstawiono wyniki badań dotyczące przydatności parametrów analizy fraktalnej do oceny mikrogeometrii ściernicy. Wykazano związek wyznaczanych parametrów z rozmiarem ziarna oraz z efektami procesu szlifowania.

PODSUMOWANIE

Pomiar, opis oraz ocena mikrogeometrii czynnej powierzchni ściernicy są zadaniami trudnymi. Nie istnieje bowiem uniwersalna metoda pomiarowa topografii CPS, a kompleksowa ocena ściernicy wymaga zastosowania więcej niż jednej z nich.

Dobór narzędzia pomiarowego powinien uwzględniać rodzaj dostarczanych informacji oraz ich jakość, a także być uzależniony od wymaganej rozdzielczości poziomej i pionowej oraz wielkości obszaru pomiarowego. Przydatność konkretnej metody zależy m.in. od wielkości i koncentracji ziaren ściernych, a także od właściwości materiału ziaren i osnowy.

Do ilościowego oraz jakościowego opisu CPS stosuje się najczęściej parametry 2D, uzyskane w rezultacie analizy obrazów mikroskopowych lub zmierzonego dwuwymiarowego profilu powierzchni, a także parametry 3D, wyznaczone na podstawie wyników pomiaru stereometrii CPS.

LITERATURA

- [1] ADAMIK A., MARKUL J., *Wpływ budowy ściernicy o spoiwie szklanokrystalicznym na stereometrię czynnej powierzchni*. XXIX Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Gdańsk-Jurata 2006, s.21-24.
- [2] BERNAT A., KACALAK W., *Visual inspection in estimation of stereometric parameters of cutting surface of abrasive tools, overview of the methodology in the approach to the problem*. XXXII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Koszalin, 2009, 147-170.
- [3] BIRDI K. S., *Scanning probe microscopes: applications in science and technology*. CRC Press, Boca Raton, 2003.
- [4] BLACHARSKI W., *Zużycie ziarn regularnego azotku boru podczas cięcia stali szybko tnącej w warunkach samoostrzenia ściernicy*. XV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Rzeszów, 1992, 121-128.
- [5] BLUNT L., EBDON S., *The application of three-dimensional surface measurement techniques to characterizing grinding wheel topography*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 36(11):1207-1226, 1996.
- [6] BLUNT L., JIANG X., *Three dimensional measurement of the surface topography of ceramic and metallic orthopaedic joint prostheses*. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2000, 11, 235-246.
- [7] BUTLER D.L., BLUNT L.A., SEE B.K., WEBSTER J.A., STOUT K.J., *The characterisation of grinding wheels using 3d surface measurement techniques*. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127(2), 234-237.
- [8] CAI R., ROWE W.B., *Assessment of vitrified CBN wheels for precision grinding*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(12-13), 1391-1402.
- [9] CIAŁKOWSKA D., WIŚNIEWSKA M., *Możliwości oceny topografii czynnej powierzchni struny zbrojonej trwale za pomocą nowoczesnych metod mikroskopii*. XXXV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Wrocław, 2012, 81-91.
- [10] DEJA M., *Zużycie narzędzi ze spoiwem galwanicznym w mikroszlifowaniu powierzchni płaskich z kinematyką docierania*. XXXV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Wrocław, 2012, 177-184.
- [11] ISMAIL M. F.; YANAGI K., ISOBE, H., *Characterization of geometrical properties of electroplated diamond tools and estimation of its grinding performance*. Wear, 2011, 271, 559-564.
- [12] ISMAIL M. F.; YANAGI K., ISOBE, H., *Geometrical transcription of diamond electroplated tool in ultrasonic vibration assisted grinding of steel*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 62, 24-31.
- [13] KACALAK W., KUNC R., *Analiza wpływu parametrów kształtowania powierzchni czynnej ściernicy na parametry statystyczne oceny aktywności ziaren ściernych*. XXXV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Wrocław, 2012, 25-36.
- [14] KACALAK W., SZAFRANIEC F., *Metodyka i algorytmy modelowania i symulacji oraz badań i analizy procesów obróbki ściernicy*. XXXV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Wrocław, 2012, 205-234.

MECHANIK NR 8-9/2013
XXXVI NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ

- [15] KACALAK W., TANDECKA K., *Analiza wpływu cech stereometrycznych i rozmieszczenie wierzchołków ziaren folii ściernych na ukształtowanie nierówności obrabianej powierzchni*. XXXV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Wrocław, 2012, 115-126.
- [16] KACALAK W., TANDECKA K., *Metodyka badań rozmieszczenia ziaren ściernych na foliach do mikrowyglądania*. XXXII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Koszalin, 2009, 215-224.
- [17] KACALAK W., TANDECKA K., *Metodyka oceny topografii folii ściernych ze szczególnym uwzględnieniem rozmieszczenia ziaren ściernych*. XXXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Łódź, 2010, 193-204.
- [18] KAPŁONEK W., NADOLNY K., *Skaterometryczna ocena ściernic po procesie szlifowania walcowych powierzchni wewnętrznych materiałów trudnoobrabialnych*. XXXIV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Gdańsk, 2011, 39-52.
- [19] KAPŁONEK W., NADOLNY K., SUTOWSKI P., *Ocena stanu czynnej powierzchni ściernicy z wykorzystaniem elektronowej mikroskopii skaningowej oraz technik przetwarzania i analizy obrazu*. XXXIV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Gdańsk, 2011, 29-38.
- [20] KAPŁONEK W., NADOLNY K., VALICEK J., ZELANAK M., *Pomiary i analizy powierzchni narzędzi ściernych z wykorzystaniem nowoczesnych technik mikroskopii konfokalnej*. XXXV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Wrocław, 2012, 43-54.
- [21] KAPŁONEK W., NADOLNY K., *Zastosowanie skaterometrii laserowej oraz technik przetwarzania i analizy obrazu do oceny czynnej powierzchni ściernic z mikro-krystalicznego korundu spiekanego*. Podstawy i technika obróbki ściernej. XXXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Łódź, 2010, 153-164.
- [22] KAPŁONEK W., TOMKOWSKI R., *Zastosowanie systemu pomiarowego Talysurf CLI 200 do analizy topografii powierzchni narzędzi ściernych*. XXXII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Koszalin, 2009, 224-234.
- [23] LEŻAŃSKI P., LAJMERT. P., *Zastosowanie parametrów krzywej udziału materiałowego do oceny zużycia ściernicy*. XXVII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Koszalin-Sarbinowo, 2004, 275-282.
- [24] LIAO T.W., *Fractal and DDS characterization of diamond wheel profiles*. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 53(3-4), 567-581.
- [25] MALKIN S., *Grinding Technology. Theory and Applications of Machining with Abrasives*. Ellis Horwood Limited, 1989.
- [26] NGUYEN A.T., BUTLER D.L., *Correlation of grinding wheel topography and grinding performance: A study from a viewpoint of threedimensional surface characterisation*. Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, 2008, 208(1-3), 14-23.
- [27] PAWLUS P., *Topografia powierzchni*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2005.
- [28] POLINI, W., TURCHETTA S., *Test protocol for micro-geometric wear of sintered diamond tools*. Wear, 2004, 257, 246-256.
- [29] SCOTT P.J., *Novel Areal Characterisation Techniques*. Rozdział w Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards "surfstand". Kogan Page Science, London and Sterling, 2003, 43-62.
- [30] STANKIEWICZ-BRUDNIK B., MAJEWSKA-ALBIN K., MARKUL J., SKRZYPEK S., *Ściernice z CBN ze spoiwem ceramicznym domieszkowane submikrokrystalicznym korundem spiekanym*. XXV Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Wrocław-Duszniki Zdrój, 2002, 275-282.
- [31] STOUT K. J., BLUNT L., *The tree-dimensional surface topography*. Penton Press, London, 1994.
- [32] TERRY A.J., BROWN C.A., *A comparison of topographic characterization parameters in grinding*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1997, 46(1), 497-500.
- [33] VERKERK J. *et al.*, Final report concerning CIRP cooperative work on characterization of grinding wheel topography. Annals CIRP, 1977, 26(2), p. 365.
- [34] WHITEHOUSE D. J., *Surfaces and their measurement*. Taylor Hobson Ltd, New York, 2002.
- [35] YAN L., RONG Y.M., FENG J., ZHOU Z., *Three-dimension surface characterization of grinding wheel using white light interferometer*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 55(1-4), 133-141.