

	Organizatorzy: Politechnika Łódźka Wydział Mechaniczny	XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

Odwzorowanie zmian uproszczonego modelu geometrycznego CPS ściernicy z CBN w kontekście wybranych parametrów jej topografii

Depiction of changes of preliminary geometric model of electroplated grinding
wheel in the context of its selected surface topography parameters

ANNA BAZAN
ANDRZEJ KAWALEC
MAREK KROK
IRENEUSZ PIOTR CHMIELIK *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.336

W artykule zaprezentowano wyniki badań dotyczące uproszczonego modelu mikrogeometrii ściernicy z CBN ze spoiwem galwanicznym. Stworzony model CAD czynnej powierzchni ściernicy był modyfikowany w celu odwzorowania różnego stopnia zanurzenia ziaren w spoiwie oraz procesu zużycia ściernicy.

SŁOWA KLUCZOWE: modelowanie topografii powierzchni, ściernice ze spoiwem galwanicznym

This paper presents the results of studies concerning the preliminary model of electroplated grinding wheel surface topography. Created model was modified to depict changes of topography due to the different thickness of bond layer and grinding wheel wear.

KEYWORDS: surface topography modeling, electroplated grinding wheel

Wstęp

Szlifowanie jest powszechnie stosowanym rodzajem obróbki mechanicznej. Pomimo jego częstego wykorzystania, ze względu na jego złożoność, jest to proces, który jest stosunkowo trudny do kontrolowania. Zdolność do kontrolowania procesu szlifowania zależy w głównej mierze od posiadanej wiedzy dotyczącej interakcji pomiędzy czynną powierzchnią ściernicy (CPS) i powierzchnią obrabianą. Informacje dotyczące procesu i jego natury mogą być pozyskiwane na drodze eksperymentu lub odpowiedniej symula-

cji. Obydwie metody mają swoje wady i zalety. Najlepszą praktyką jest więc łączenie tych metod badawczych. Należy pamiętać, że wyniki symulacyjne powinny być zweryfikowane doświadczalnie. Model symulacyjny, który został pozytywnie zweryfikowany, tj. który z zadowalającą dokładnością odzwierciedla rzeczywiste zjawisko, może do pewnego stopnia ograniczyć konieczność wykonywania badań eksperymentalnych. Prowadzi to zazwyczaj do oszczędności czasowych i finansowych.

Jednym z kluczowych zagadnień dotyczących przeprowadzania symulacji procesu szlifowania jest stworzenie wiarygodnego modelu mikrogeometrii czynnej powierzchni ściernicy [1, 2, 3]. Przegląd modeli topografii CPS zawiera praca [4]. Nowszy model wraz z metodyką modelowania powierzchni czynnej narzędzi ściernych z uwzględnieniem korelacji przestrzennego rozmieszczenia ich wierzchołków przedstawione są w pracy [5]. Modelowanie stereometrii pojedynczych ziaren ściernych opisano w artykule [6].

Modelowanie topografii CPS jest zadaniem trudnym ze względu na występowanie bardzo wielu ostrzy skrawających o niezdefiniowanej geometrii, które charakteryzują się zazwyczaj losowym rozkładem na czynnej powierzchni ściernicy. Autorzy podjęli badania nad opracowaniem własnego, uproszczonego modelu topografii CPS z nasypem z CBN, który uwzględniałby specyfikę ściernic jednowarstwowych.

W artykule zaprezentowano wyniki badań dotyczących uproszczonego modelu mikrogeometrii ściernicy z regularnego azotku boru (CBN) ze spoiwem galwanicznym. Stworzony model CAD czynnej powierzchni ściernicy był modyfikowany w celu odwzorowania procesu zużycia ściernicy oraz różnego stopnia zanurzenia ziaren w spoiwie.

* mgr inż. Anna Bazan (abazan@prz.edu.pl),
dr hab. inż. Andrzej Kawalec (ak@prz.edu.pl),
mgr inż. Marek Krok (mkrok@prz.edu.pl),
dr inż. Ireneusz Piotr Chmielik (p.chmielik@taylor-hobson.pl)

W przypadku ściernic z CBN ze spoiwem galwanicznym dominuje zużycie poprzez ścieranie ziaren i ich mikrowykruszanie oraz, w mniejszym stopniu, poprzez wrywanie ziaren ze spoiwa [7, 8, 9]. Z tego powodu ww. rodzaje zużycia zostały wzięte pod uwagę podczas symulacji.

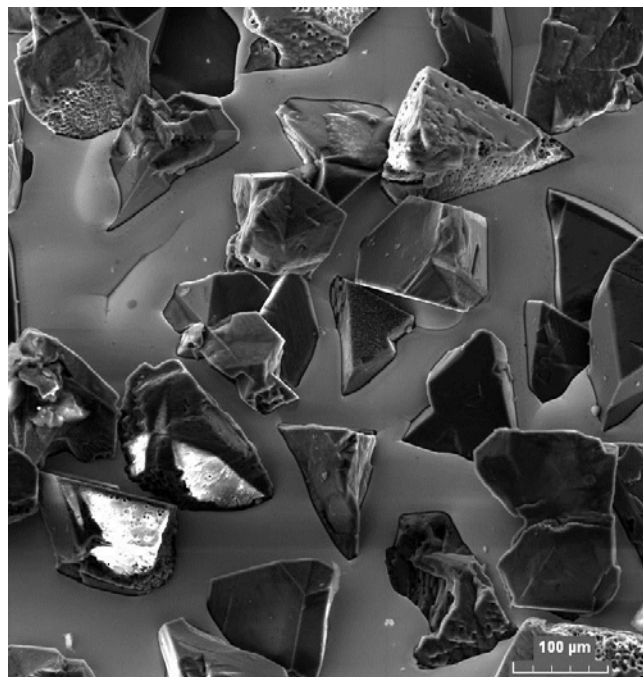
Grubość powłoki galwanicznej, tj. warstwy spoiwa związana jest z wielkością ziarna ściernego. Grubości powłoki galwanicznej, a tym samym wysokość ziaren ponad spoiwem zależy od naprężeń występujących podczas procesu szlifowania. Przy bardzo małych naprężeniach ekspozycja ziaren może sięgać do 70% średniej wielkości ziarna d , natomiast przy szlifowaniu materiałów trudnoskrawalnych jedynie 20% [10]. Zazwyczaj przyjmuje się grubość warstwy spoiwa na poziomie 50% średniej wielkości ziarna [11]. Wysokość ziaren ponad spoiwem decyduje o objętości przestrzeni dostępnej na formowanie oraz gromadzenie wiórów oraz o siłach wiązania ziarna w spoiwie. Wraz ze wzrostem grubości powłoki galwanicznej siły wiązania rosną, natomiast maleje przestrzeń dostępna na wióry, stąd też uzasadnione jest opracowanie modelu zdatnego w określonym zakresie odwzorować chwilowe stany równowagi procesu wypełniania dostępnych, wolnych przestrzeni wiórami i innymi materiałami uczestniczącymi w procesie szlifowania.

Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie możliwości modelowania procesu zużycia ściernic z CBN ze spoiwem galwanicznym poprzez obcięcie ziaren płaszczyzną równoległą do poziomu spoiwa, której położenie odzwierciedlałoby poziom zużycia promieniowego. Ponadto chciano sprawdzić, czy w sensie geometrycznym zamodelowane powierzchnie, dla których zwiększono grubość warstwy spoiwa są podobne do powierzchni, na których zmniejszono wysokości ziaren ponad spoiwem obrazując ich zużycie. Wnioski z przeprowadzonych badań miały służyć dalszemu ukierunkowaniu prac związanych z modelowaniem CPS ściernic ze spoiwem galwanicznym oraz prac eksperymentalnych. Z pewnością wskazane jest dążyć w przyszłości do stworzenia kompleksowego, sparametryzowanego modelu CPS i systemu symulacji procesu szlifowania, ale w niniejszym artykule uwaga skupiona jest na ww. celach. Wnioski wynikające z wykonanych analiz mają pomóc w lepszym zrozumieniu zmian wybranych parametrów topografii CPS wraz ze zużyciem CPS i modyfikacją poziomu spoiwa.

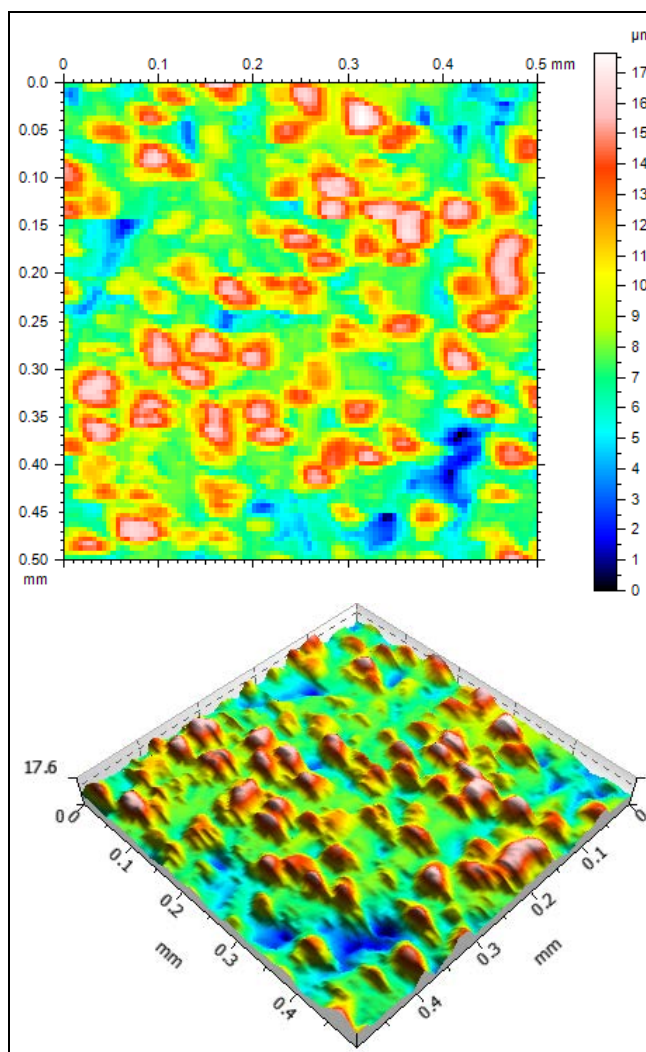
Modelowanie czynnej powierzchni ściernicy

W celu stworzenia geometrycznego modelu CPS ściernicy badaniom poddano rzeczywistą ściernicę z CBN ze spoiwem galwanicznym o numerze ziarna B25, który odpowiada średniej wielkości ziarna $d=25\ \mu\text{m}$. Powierzchnia ściernicy była obserwowana za pomocą mikroskopu SEM (rys. 1.), a jej topografia (rys. 2.) została zmierzona metodą stykową za pomocą profilometru 3D Talyscan 150 z krokiem próbkowania w osi X oraz w osi Y wynoszącym $5\ \mu\text{m}$.

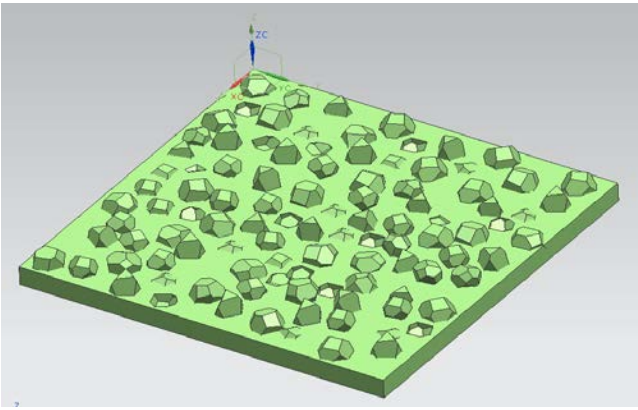
Na podstawie obserwacji zdjęć SEM zamodelowano kształt dwóch ziaren ściernych bazujących na geometrii czworościanu i ośmiościanu [12]. Ziarna po przeskalowaniu oraz różnym obróceniu w przestrzeni zostały losowo rozmieszczone na płycie bazowej o wymiarach $0,5\ \text{mm} \times 0,5\ \text{mm}$, która miała przedstawiać fragment CPS ze spoiwem (rys. 3.). Ponieważ, na obrazach topografii (rys. 2.) oraz zdjęciach SEM widoczne są doliny, powstałe na skutek wypadnięcia ziaren, na tworzonym modelu CAD kilkanaście ziaren zostało odjętych od płyty bazowej. Grubość warstwy spoiwa przyjęto na ok. 50% średniej wielkości ziarna B25.



Rys.1. Zdjęcie z mikroskopu SEM ściernicy z CBN ze spoiwem galwanicznym

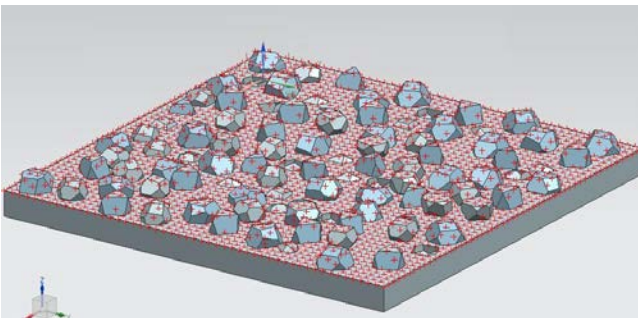


Rys. 2. Topografia ściernicy z CBN ze spoiwem galwanicznym zmierzona profilometrem stykowym



Rys.3. Model CAD ściernicy z CBN ze spoiwem galwanicznym

W celu zamodelowania procesu pomiaru topografii na modelu CPS stworzono kwadratową siatkę punktów, reprezentujących punkty pomiarowe (rys. 4.). W celu porównania modelu pierwotnego – który następnie był modyfikowany dla odwzorowania zużycia oraz różnego poziomu spoiwa – z rzeczywistymi zmierzonymi powierzchniami wyłoniono współrzędne siatki „punktów pomiarowych”. Wielkość oczka siatki $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ odpowiadała krokom próbkowania w wirtualnym pomiarze topografii powierzchni utworzonego modelu CPS. Ze względu na długi czas tworzenia siatki, dla pozostałych powierzchni odległość pomiędzy punktami w osiach X i Y przyjęto równą $10 \mu\text{m}$.



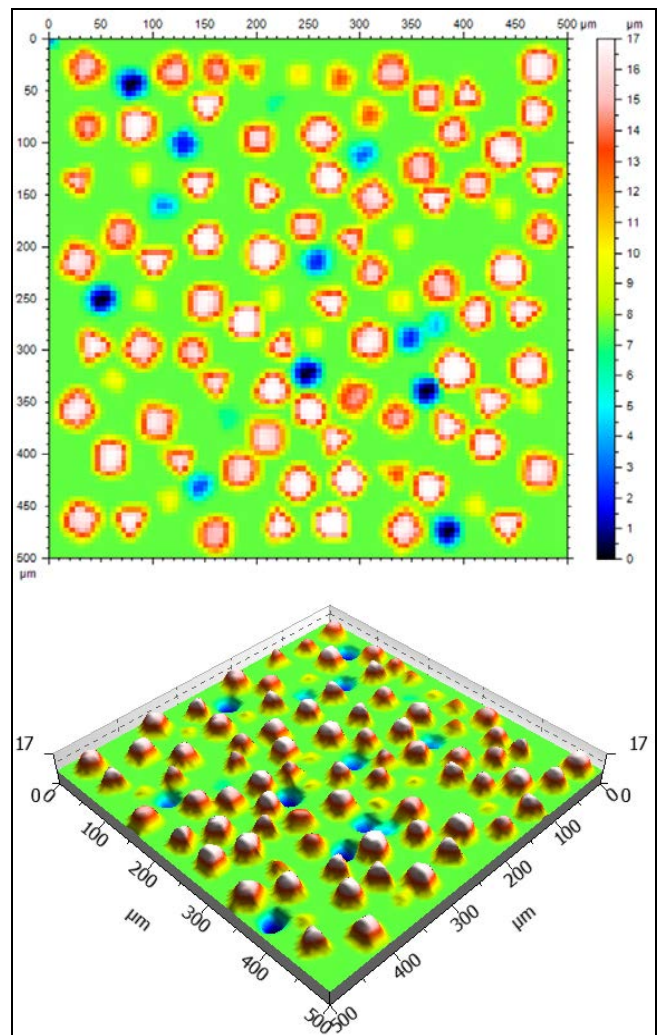
Rys.4. Zasympulowane punkty pomiarowe na zamodelowanej powierzchni

Wygenerowany na podstawie wyżej opisanego modelu CPS zbiór punktów został następnie wyeksportowany do pliku STEP. Po przetworzeniu pliku STEP do formatu ASCII mógł być odczytany w oprogramowaniu do analizy topografii powierzchni TalyMap Platinum 7.0. Wyniki symulacji pomiaru topografii zamodelowanej powierzchni jako mapy topografii są zaprezentowane na rys. 5.

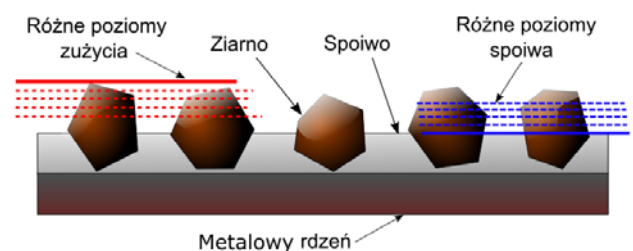
Zużycie ściernic z CBN ze spoiwem galwanicznym zachodzi głównie poprzez ścieranie ziaren i ich mikrowykruszanie. W mniejszym stopniu obserwuje się również wrywanie ziaren ze spoiwa. W celu zamodelowania ścierania oraz mikrowykruszania ziaren analizowane ziarna modelu CPS zostały obcięte płaszczyznami równoległymi do powierzchni spoiwa. Położenie tych płaszczyzn odzwierciedlało zużycie promieniowe na poziomie $1,25 \mu\text{m}$, $2,5 \mu\text{m}$, $3,75 \mu\text{m}$ oraz $5 \mu\text{m}$ (rys. 6.). Uwzględniając proces wrywania ziaren, przy opracowywaniu modeli CPS dla różnego poziomu zużycia promieniowego usuwano z modeli pojedyncze ziarna, odejmując je od płyty bazowej.

Grubość warstwy spoiwa zmieniano w zakresie od 50% do 70% średniej wielkości ziarna d co 5%, czyli co $1,25 \mu\text{m}$ (rys. 6.). Większa grubość spoiwa wiąże się z lepszym wiązaniem ziaren, przez co liczba ziaren, które wypadają lub są wrywane ze spoiwa jest mniejsza. Wraz ze wzrostem gru-

bości spoiwa w modelach CPS zmniejszono liczbę ziaren odejmowanych od płyty bazowej.



Rys.5. Efekt symulacji pomiaru zamodelowanej powierzchni ściernicy



Rys.6. Schemat budowy ściernicy ze spoiwem galwanicznym z ideowym przedstawieniem modyfikacji wprowadzanych w jej modelu

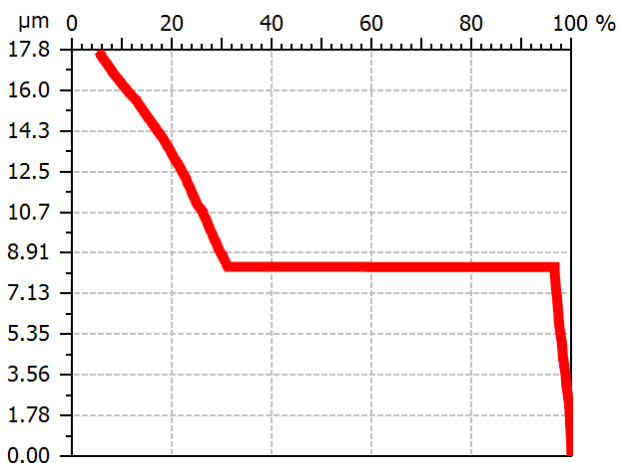
Porównanie modelu ściernicy z rzeczywistą powierzchnią ściernic

Wybrane parametry topografii pierwotnego/wyjściowego modelu CPS (zużycie promieniowe $0 \mu\text{m}$, grubość warstwy spoiwa $d \times 50\%$) o powierzchni $0,5 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$ zostały porównane z wynikami pomiarów 22 fragmentów ściernic o powierzchni $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$. Wyniki dotyczące wybranych parametrów topografii ściernic rzeczywistych oraz modelu przedstawiono w tab.1.

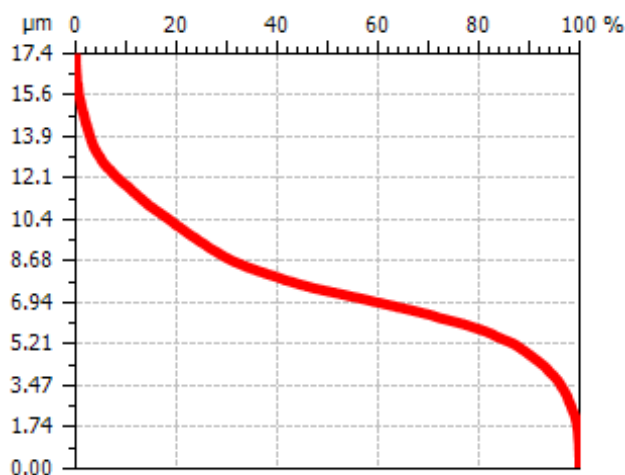
Tab.1. Wybrane parametry topografii powierzchni rzeczywistych CPS i powierzchni wirtualnej CPS w opracowanym modelu

Parametr	Rodzaj powierzchni	Rzeczywista powierzchnia ściernicy			Powierzchnia modelu ściernicy
		wartość średnia z SD	max	min	
Sa [μm]		2,64±0,58	1,90	3,66	2,75
Sq [μm]		3,39±0,64	2,44	4,45	3,49
Sp [μm]		16,98±4,39	9,21	24,15	10,48
Vmp [μm]		0,19±0,03	0,13	0,23	0,18
Sdq		0,43±0,09	0,29	0,55	0,46
Sz [μm]		32,65±6,3	20,94	41,85	40,193
Ssc [1/ μm]		0,07±0,02	0,04	1,1	0,06
Spk [μm]		6,25±1,57	3,74	8,44	12,04
Sk [μm]		4,93±0,67	3,92	6,33	0,85869
Svk [μm]		3,09±0,59	2,19	3,96	3,3918
Sbi		0,36±0,13	0,22	0,35	1,37
Sal [μm]		26,8±2,82	25	30	20
Str		0,9±0,1	0,75	1,00	1,00
Sds [1/mm ²]		1080±163	880	1357	346

Znaczące różnice pomiędzy wartościami parametrów obliczonych dla rzeczywistych ściernic z CBN ze spoiwem galwanicznym a wartościami dla zamodelowanej ściernicy występują dla parametrów związanych z krzywą udziału materiałowego Spk (zredukowana wysokość wzniesień), Sk (wysokość rdzenia) oraz Sbi (wskaźnik nośności powierzchni). Na powierzchni modelowanej spoiwo jest płaską powierzchnią, wyraźnie odcinającą się od ziaren, natomiast w rzeczywistości powierzchnia spoiwa jest falista. Dodatkowo, symulacja pomiaru nie uwzględniała błędów pomiaru spowodowanych geometrią końcówki pomiarowej. Wykorzystanie końcówki pomiarowej sprawia, że granica pomiędzy spoiwem a stromymi ścianami ziaren nie może być poprawnie odwzorowana. Z ww. powodów na rzeczywistej powierzchni rozdział pomiędzy ziarnami a spoiwem nie jest tak dobrze widoczny jak na powierzchni zamodelowanej. Potwierdza to charakter krzywych nośności obydwu powierzchni (rys. 7-8).



Rys.7. Krzywa udziału materiałowego zamodelowanej powierzchni ściernicy



Rys.8. Krzywa udziału materiałowego rzeczywistej powierzchni ściernicy

Dla powierzchni zamodelowanej stosunkowo łatwo można rozpoznać, że strefę wzniesień tworzą ziarna, strefę rdzenia głównie spoiwo, a strefę wgłębień doliny po wyrwanych ziarnach. Na krzywej nośności powierzchni rzeczywistej przejście pomiędzy strefą rdzenia i strefą wzniesień jest bardziej płynne. Z analizy krzywej udziału materiałowego oraz obrazów topografii można wywnioskować, że część punktów, które należą do ziaren leży w strefie rdzenia.

Istotna różnica w wartości parametru Sal (wskaźnik zanikania funkcji autokorelacji) porównywanych powierzchni wskazuje, że w celu zbliżenia modelu do rzeczywistej CPS należałoby uwzględnić możliwość modyfikacji przestrzenno-rozkładu lokalizacji ziaren.

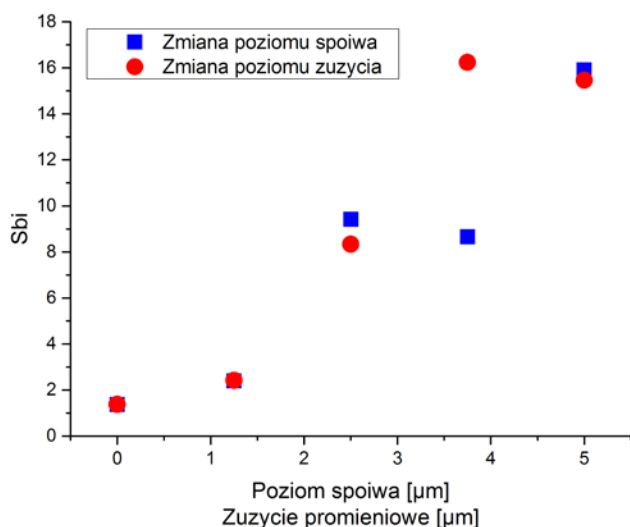
Znaczące różnice wartości występują również dla parametru Sds (średnia gęstość wzniesień). Wynikają one z faktu, że na zamodelowanej ściernicy na spoiwie wzniesienia nie występują, natomiast na rzeczywistej ściernicy wzniesienia mogą być rozpoznane ze względu na jej falisty charakter. Ponadto na zamodelowanych ziarnach będzie prawdopodobnie występowało tylko jedno wzniesienie, natomiast na ziarnach rzeczywistych wzniesień może być więcej.

Wyniki badań dla powierzchni o różnym poziomie zużycia oraz różnej grubości warstwy spoiwa

Parametry topografii powierzchni zostały obliczone dla pięciu zamodelowanych powierzchni o różnych poziomach zużycia promieniowego: 0 μm (ściernica nowa), 1,25 μm , 2,5 μm , 3,75 μm oraz 5 μm , a także dla pięciu zamodelowanych powierzchni o różnych grubościach spoiwa od 50% do 70% średniej wielkości ziarna d . Przyjmując poziom spoiwa dla ściernicy o grubości spoiwa $d \times 50\%$ za poziom 0 μm , na kolejnych modelowanych powierzchniach spoiwo było na poziomie 1,25 μm , 2,5 μm , 3,75 μm oraz 5 μm . Zwiększenie wartości zużycia promieniowego o 1,25 μm sprawia, że maksymalna wysokość ziaren ponad spoiwem maleje o 1,25 μm . Ten sam efekt uzyskuje się poprzez zwiększenie grubości spoiwa o tą samą wartość.

Zarówno dla powierzchni modeli odzwierciedlających różne zużycie, jaki i na powierzchniach modelowanych w celu zobrazowania różnej grubości warstwy spoiwa największe względne zmiany wartości zaobserwowano dla parametru Sbi (współczynnik nośności powierzchni) (rys. 9.). Badania rzeczywistych ściernic z CBN ze spoiwem galwanicznym [6] wykazały, że parametr ten należy do grupy

parametrów, które charakteryzują się największą czułością na zużycie badanych ściernic.



Rys.9. Wartości parametru S_{bi} modelowanych powierzchni

Wartość S_{bi} jest ilorazem $S_q/\eta_{0.05}$. Analizując zmiany parametrów S_q oraz $\eta_{0.05}$ w zależności od poziomu zużycia oraz poziomu wysokości spojwa widać, że przebiegi zmienności danych parametrów mają podobny charakter dla rozpatrywanych dwóch rodzajów modyfikacji modelu (zmiana poziomu spojwa, zmiana zużycia). W punkcie odpowiadającym poziomowi spojwa 3,75 µm widać jednak pewne odstępstwo od generalnego trendu zmian $\eta_{0.05}$. W przypadku wszystkich analizowanych punktów (poza pierwszym, który jest wspólny dla obydwu modyfikacji modelu) różnica w wartości $\eta_{0.05}$ dla różnego poziomu zużycia i różnego poziomu spojwa wahała się w granicach 0,19-0,14 µm. W przypadku poziomu 3,75 µm różnica ta wynosi niecałe 0,01 µm. Można więc sądzić że rozbieżność w wartości parametru S_{bi} dla poziomu 3,75 µm wynika z większej wartości $\eta_{0.05}$ dla modelu o zmieniającym się poziomie spojwa niż to wynika z generalnego trendu. Z kolei zauważona zmiana wartości parametru $\eta_{0.05}$ jest najprawdopodobniej związana z dyskretnym charakterem przyjętego modelu ziaren – istnieje możliwość, że przy zwiększaniu poziomu zużycia następuje lokalna skokowa zmiana pola powierzchni 5% udziału materiałowego branej pod uwagę przy obliczaniu parametru $\eta_{0.05}$. Wskazuje to na potrzebę zbadania ww. zależności na modelach o podobnych ogólnych charakterystykach geometrycznych ziaren, ale różniących się ich wzajemnym położeniem.

Parametry Sal oraz Str (wskaznik tekstury powierzchni) mają taką samą wartość dla wszystkich modelowanych powierzchni. Przestrzenne właściwości modelowanych powierzchni były modyfikowane głównie poprzez zwiększanie lub zmniejszanie liczby ziaren, które były odejmowane od płyty bazowej. Zmiany te jednak w kontekście obliczania ww. parametrów nie były istotne i nie zostały odzwierciedlone w wartościach tych parametrów. Wartość parametru Str wynosząca 1 dla wszystkich modelowanych powierzchni świadczy, że są one izotropowe. Parametry Sal oraz Str obliczone dla rzeczywistych CPS dla większości badanych powierzchni nie wykazywały żadnych zmian wartości na skutek zużycia ściernic [6].

Podsumowanie

Na podstawie porównania zmienności wartości parametrów na powierzchniach rzeczywistych, jak i na powierzchniach modelowanych o różnym poziomie zużycia można stwierdzić, iż proces zużycia ziaren ściernych z CBN zachodzące poprzez ich ścieranie oraz mikrowykruszanie może być modelowany za pomocą obcinania ziaren powyżej pewnego poziomu adekwatnego do zużycia promieniowego ściernicy. W celu przybliżenia powierzchni modelowanych do powierzchni rzeczywistych należałoby uwzględnić możliwość modyfikacji przestrzennego rozkładu lokalizacji ziaren.

W celu określenia, które parametry topografii mogą świadczyć o podobnych lub różnych właściwościach skrawanych modelowanych powierzchni o różnym poziomie spojwa oraz różnym stopniu zużycia, wskazane jest przeprowadzenie dalszych analiz.

W przeprowadzonych badaniach nie porównywano o ile w procesie zużycia zmieniają się wartości parametrów na ściernicach rzeczywistych i modelowanych. Badania miały na celu ujawnić jedynie generalną tendencję tych zmian na ściernicach modelowanych i, poprzez porównanie wrażliwości obliczanych parametrów topografii na zużycie na powierzchniach modelowanych oraz rzeczywistych. Wnioski z tych badań miały m.in. wskazać na to, czy stworzony model CPS spełnia postawione założenia.

Autorzy do dnia powstania artykułu nie dysponowali ściernicami z CBN ze spoiwem galwanicznym o różnej grubości warstwy spojwa. Wiarygodność modelu o różnym stopniu zanurzenia ziaren w spoiwie musi być zweryfikowana eksperymentalnie. Ponadto należy sprawdzić, czy intensywność zmian topografii pod wpływem zużycia rzeczywistych ściernic i powierzchni modelowanych są podobne.

LITERATURA

- Chen X., Rowe W. B.: Analysis and simulation of the grinding process. Part I: generation of the grinding wheel surface. *Int. J. Math. Tools Manufact.*, 36(8), str. 871-882, 1996.
- Nguyen T.A., Butler D.L.: Simulation of precision grinding process, part 1: generation of the grinding wheel surface. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(11), str. 1321-1328, 2005.
- Salisbury E.J., Domala K.V., Moon K.S., Miller M.H., J.W. Sutherland, "A Three-Dimensional Model for the Surface Texture in Surface Grinding, Part 1: Surface Generation Model", *J. Manuf. Sci. Eng.* 123(4), str. 576-581, 2001.
- Doman D.A., Warkentin A., Bauer R.: A survey of recent grinding wheel topography models, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 46, Issues 3-4, str. 343-352, 2006.
- Kacalak W., Szafraniec F., Tandecka K.: Metodyka modelowania powierzchni czynnej narzędzi ściernych z uwzględnieniem korelacji przestrzennego rozmieszczenia ich wierzchołków dla określonych ściernic rzeczywistych. *Mechanik*, 9, str. 185-192, 2014.
- Tomkowska A., Bałasz B.: Pomiary i modelowanie stereometrii ziaren ściernych. *PAK*, 55, str. 268-281, 4/2009.
- Shi Z., Malkin S.: An investigation of grinding with electroplated (CBN) wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(1), str. 267 - 270, 2003.
- Bazan A., Kawalec A.: Topografia czynnej powierzchni ściernicy z CBN ze spoiwem galwanicznym. *Mechanik*, 8-9, str. 38-45, 2013.
- Kawalec A., Bazan A., Krok M., Chmielik I.P.: Porównanie wyników badań stykowych dotyczących parametrów topografii CPS ściernic z CBN zmieniających się wraz z jej zużyciem. Referat zgłoszony na XXXVIII NSOS Łódź – Uniejów, 2015.

10. Klocke F., Manufacturing Processes 2. Grinding, Honing, Lapping. Berlin, Springer, 2009.
11. Marinescu I.D., Tonshoff H.K., Inasaki I.: Handbook of Ceramic Grinding & Polishing. William Andrew Publishing, Norwich, NY, 1999.
12. Aurich J.C., Kirsch B.: Kinematic simulation of high performance grinding for analysis of chip parameters of single grains. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 5 (3), str. 164-174, 2012.