

Zastosowanie analizy map i motywów do oceny zużycia ziaren ściernych ściernicy jednowarstwowej

Application of map and motif analysis for the wear evaluation of abrasive grains on single-layer grinding wheel

ANNA BAZAN
ANDRZEJ KAWALEC
IRENEUSZ CHMIELIK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.12.199>

W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania programu MountainsMap Premium 7.4 do analizy ilościowej ściernicy z cBN na czynnej powierzchni ściernicy jednowarstwowej na różnych etapach jej zużycia. Porównano dwie dostępne w tym oprogramowaniu metody rozpoznawania ziaren, tj. analizę wysp i analizę motywów.

SŁOWA KLUCZOWE: topografia ściernicy, zużycie ściernicy, ściernica jednowarstwowa

The article presents the possibilities of using the MountainsMap Premium 7.4 program in the context of quantitative analysis of cBN abrasive on the single-layer grinding wheel active surface at various stages of grinding wheel wear. Two methods of grain separation available in the above software, ie. island analysis and motif analysis, were compared.

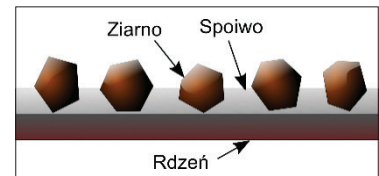
KEYWORDS: grinding wheel topography, grinding wheel wear, single-layer grinding wheel

W wielozadaniowych i wieloosiowych centrach szlifierskich – zwłaszcza w przypadku produkcji elementów dla przemysłu lotniczego i samochodowego – coraz częściej wykorzystuje się ściernice z materiałów supertwardych (regularnego azotku boru cBN lub polikrystalicznego diamentu PCD) ze spoiwem nanoszonym metodą galwaniczną [1–3], pozwalających na stosowanie większych prędkości szlifowania, a w konsekwencji na zmniejszenie sił skrawania, wydłużenie okresu trwałości ściernicy oraz poprawę jakości szlifowanej powierzchni [4–6]. Takie ściernice zazwyczaj są produkowane jako jednowarstwowe. Ziarna ściernic tworzące pojedynczą warstwę ścierniwa są związane z metalowym rdzeniem ściernicy za pomocą spoiwa, głównie niklowego (rys. 1).

Cały potencjał skrawny takich ściernic jest zawarty w pojedynczej warstwie ścierniwa i nie ma możliwości przywrócenia ich właściwości skrawnych w procesie obciągania. Ze względu na stosunkowo duży koszt ściernic z materiałów supertwardych (w tym jednowarstwowych) i konieczność efektywnego wykorzystania tych narzędzi istotne są badania dotyczące zużywania się warstwy ścierniwa. Problem stanowi opis topografii czynnej powierzchni ściernicy (CPS), który umożliwiłby ilościową ocenę zmian topografii CPS na skutek zużycia [7–9].

Celem pracy było określenie możliwości ilościowej oceny zużycia CPS na podstawie pomiarów i analizy topografii CPS na różnych etapach eksploatacji ściernicy. Ta analiza koncentrowała się na badaniach wysp, reprezentujących ziarna, ponad określonym poziomem odcięcia, oraz wgłębień znajdujących się poniżej przyjętego poziomu odcięcia.

Rys. 1. Schemat budowy ściernicy jednowarstwowej

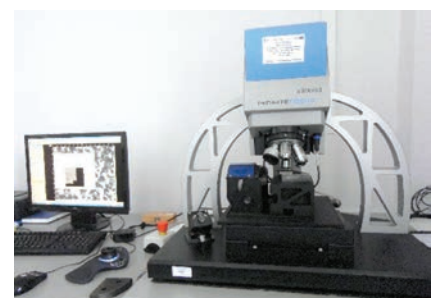


Wyspy na mierzonym obiekcie odpowiadały ziarnom ściernym lub ich najwyższym fragmentom, a wgłębienia reprezentowały dołki w spoiwie, wynikające z jego naturalnej nierówności lub powstałe na skutek wyrwania ziaren ściernych. W badaniach zużycia ściernicy istotne były głębokie wgłębienia po wyrwaniu ziaren ściernych.

Metodyka badań

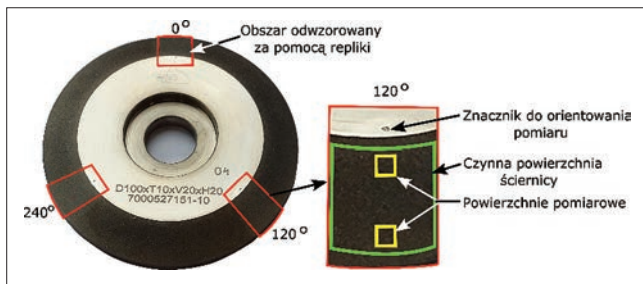
Do badań przyjęto ściernicę jednowarstwową ze spoiwem niklowym, nanoszonym metodą galwaniczną, i ze ścierniwem z cBN o numerze ziarna B35 (średniej średnicy ziaren $d_0 = 35 \mu\text{m}$). Grubość warstwy spoiwa wynosiła 50÷60% średniej średnicy ziarna. Ściernica miała kształt stożkowy o maksymalnej średnicy $d = 100 \text{ mm}$ i kącie stożka 140° . Obrabiane przedmioty były wykonane ze stali wysokostopowej Pyrowear 53 o twardości warstwy wierzchniej 81 HRA. Procesy szlifowania płaszczyzn prowadzono na szlifierce Fortis firmy Michael Deckel. Stosowano następujące parametry nastawne: prędkość szlifowania $v_s = 30 \text{ m/s}$ (dla średnicy ściernicy $d = 100 \text{ mm}$), prędkość posuwu stycznego $v_{ft} = 4250 \text{ mm/min}$, głębokość szlifowania $a_e = 20 \mu\text{m}$.

Założono, że pomiary topografii CPS będą prowadzone na różnych etapach zużycia ściernic, aby można było w sposób ilościowy określić ubytek ścierniwa powstały na skutek zużycia CPS. Przerwanie procesu szlifowania, zdejmowanie ściernicy z oprawki narzędziowej (w celu zmierzenia mikrogeometrii CPS) i powtórne mocowanie ściernicy byłyby bardzo czasochłonne. Z tego powodu topografię CPS postanowiono odwzorowywać za pomocą replik. Repliki wykonano z wykorzystaniem systemu RepliSet firmy Struers, z gumy silikonowej o czarnej barwie i o możliwościach reprodukcji szczegółów powyżej $0,1 \mu\text{m}$. Do pomiarów topografii replik odwzorowujących CPS zastosowano mikroskop InfiniteFocus firmy Alicona (rys. 2) z obiektywem $\times 20$.



Rys. 2. Mikroskop InfiniteFocus

* Dr inż. Anna Bazan (abazan@prz.edu.pl), dr hab. inż. Andrzej Kawalec (ak@prz.edu.pl) – Politechnika Rzeszowska; dr inż. Ireneusz Chmielik (p.chmielik@taylor-hobson.pl) – Taylor Hobson Polska



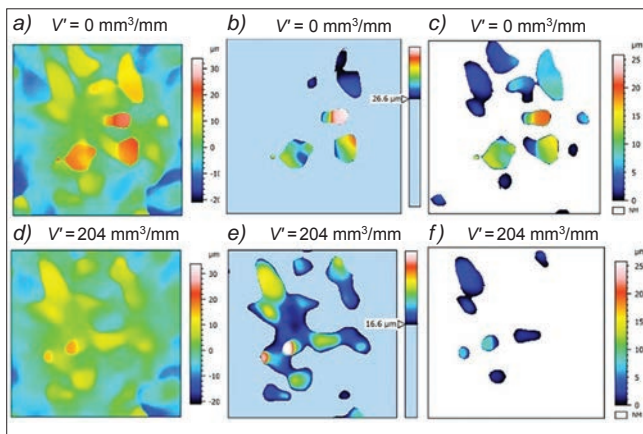
Rys. 3. Położenie powierzchni pomiarowych na badanej ściernicy

Topografię CPS zmierzono pięciokrotnie, tj. przed rozpoczęciem szlifowania oraz po osiągnięciu właściwego ubytku materiału V' równego 204, 476, 680 i 748 mm^3/mm . Na każdym etapie zużycia zmierzono sześć (w przybliżeniu tych samych) obszarów o wymiarach 2,25 $\text{mm} \times 2,50 \text{ mm}$. Powierzchnie pomiarowe były rozmieszczone co 120° wokół osi obrotu ściernicy (rys. 3). W każdym położeniu kątowym mierzono dwie powierzchnie o różnym położeniu promieniowym. Rozdzielczość pionowa pomiaru topografii CPS wynosiła 0,1 μm , a rozdzielczość pozioma – 5 μm . Krok próbkowania przyjęto jako 0,44 $\mu\text{m} \times 0,44 \mu\text{m}$.

Do wstępnego przetworzenia danych pomiarowych, tj. usunięcia profilu kształtu, oraz do wyznaczenia parametrów wysp i porów użyto programu MountainsMap Premium 7.4 [10]. Profil kształtu zmierzonych topografii odfiltrowano za pomocą dopasowania powierzchni opisanej wielomianami drugiego stopnia. Usunięto również pojedyncze piki, tj. nietypowo wysokie wzniesienia oraz głębokie wgłębienia, które często towarzyszą pomiarom optycznym.

Wyodrębnianie obszarów ziaren ściernych i głębokich wgłębień

Do zaobserwowania zmian parametrów wysp oraz porów związanych ze zużyciem ściernicy konieczne było, aby stosowane poziomy odcięcia wysp i porów przebiegały w przybliżeniu na stałej wysokości. Ten warunek miał umożliwić porównywanie tych samych fragmentów ziaren i tych samych fragmentów spoiwa, stanowiących głębokie wgłębienia, na różnych etapach zużycia. W programie MountainsMap Premium 7.4 poziom odcięcia jest ustalany automatycznie, lecz w takim przypadku uzyskane rezultaty nie są satysfakcjonujące.



Rys. 4. Fragmenty map CPS o wymiarach 0,2 $\text{mm} \times 0,2 \text{ mm}$ ściernicy nowej (a) i po uzyskaniu właściwego ubytku materiału $V' = 204 \text{ mm}^3/\text{mm}$ (d), widoki wysp ponad poziomem odcięcia ustalonym na podstawie algorytmu programu MountainsMap Premium 7.4 dla $V' = 0 \text{ mm}^3/\text{mm}$ (b) i $V' = 204 \text{ mm}^3/\text{mm}$ (e) oraz na podstawie własnego algorytmu dla $V' = 0 \text{ mm}^3/\text{mm}$ (c) i $V' = 204 \text{ mm}^3/\text{mm}$ (f)

Na rys. 4b i e przedstawiono przykładowe widoki wysp powyżej poziomu odcięcia ustalonego w sposób automatyczny. Jak widać, na ściernicy używanej (rys. 4e) poziom odcięcia jest położony znacznie niżej niż na ściernicy nowej (rys. 4b). Właśnie dlatego w przypadku używanej ściernicy ponad poziomem odcięcia znalazły się nie tylko fragmenty odpowiadające ziarnom ściernym, lecz także obszary reprezentujące spoiwo. Opracowano więc własny algorytm wyznaczania poziomów odcięcia wysp i porów. Ten algorytm bazuje na wyznaczaniu średniego poziomu spoiwa na topografiach CPS na podstawie analizy krzywej udziału materiałowego. Efekty zastosowania opracowanego sposobu odcinania wysp do badań parametrów ścierniwa na CPS przedstawiono na rys. 4c i f.

Rozpoznawanie wysp i porów oraz obliczanie ich parametrów

Wyspy i pory należało wyznaczyć po odseparowaniu ze zmierzonej topografii obszarów znajdujących się:

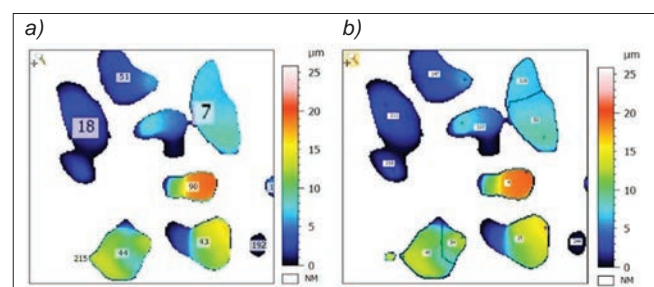
- powyżej poziomu odcięcia obszarów związanych z ziarnami ściernymi,
- poniżej poziomu odcięcia obszarów głębokich wgłębień.

Z punktu widzenia prowadzonych analiz korzystne było, jeśli jedna wyspa odpowiadała tylko jednemu ziarnu, a pory reprezentowały pojedyncze wgłębienia.

W programie MountainsMap Premium 7.4 do wyznaczenia wysp i porów służą dwa polecenia: *analiza wysp* oraz *analiza motywów*.

W przypadku analizy wysp są one rozpoznawane jedynie na podstawie poziomu odcięcia – jeżeli więc dany obszar znajduje się powyżej poziomu odcięcia, to jest uznawany za jedną wyspę (nie ma możliwości jego podziału na dwie lub więcej wysp). Innymi słowy: gdyby powyżej ustalonego poziomu odcięcia dwa ziarna stykały się ze sobą, to zostałyby rozpoznane jako jedna wyspa (zob. wyspy nr 7 i 18 na rys. 5a). Użytkownik może modyfikować jedynie współrzędną pionową, charakteryzującą poziom odcięcia. Podczas prowadzonych badań poziom odcięcia dla wszystkich odseparowanych fragmentów odpowiadających ziarnom musiał być taki sam, aby na różnych etapach zużycia ściernicy ziarna były analizowane od tego samego poziomu. Ten poziom przyjęto jako 0, tj. tożsamy z płaszczyzną odcięcia, która posłużyła do wcześniejszego odseparowania obszarów wypełnionych ziarnami. Analogicznie postąpiono w przypadku rozpoznawania porów.

Analiza motywów, oparta na segmentacji wododziałowej [11], daje więcej możliwości rozdzielania ziaren/głębokich wgłębień, które po pierwotnym odseparowaniu ze zmierzonej topografii są ze sobą połączone. W tym przypadku użytkownik może zmieniać kilka parametrów związanych z warunkami separacji wysp i poszukiwać odpowiednich ustawień podziału wysp w celu uzyskania jak najlepszych rezultatów.

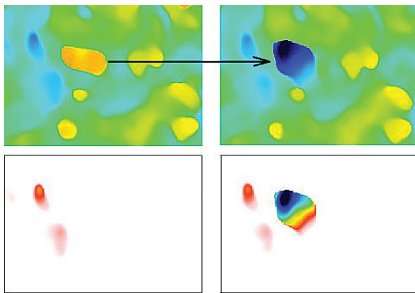


Rys. 5. Wyspy rozpoznane za pomocą polecenia: a) *analiza wysp*, b) *analiza motywów*

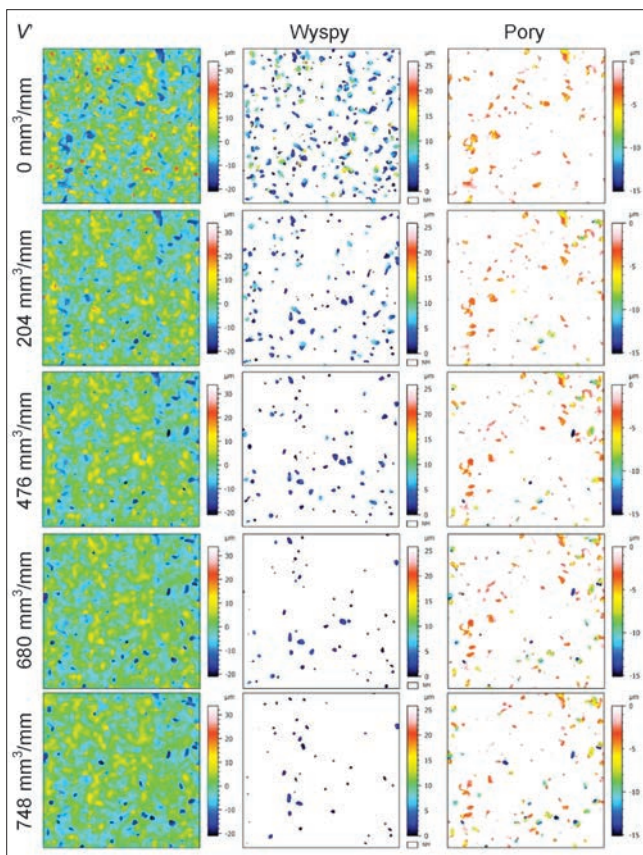
Lepsze odseparowanie wysp uzyskiwano z zastosowaniem metody motywów (rys. 5b), jednak w tym przypadku minimalna wysokość motywów nie pokrywała się z poziomem odcięcia wysp lub porów i była obliczana dla każdego motywu indywidualnie. Z tego względu parametry wysokościowe wysp i związane z nimi parametry objętościowe nie były wyznaczane względem powierzchni bazowej, wspólnej dla wszystkich wysp. Można przyjąć, że analiza motywów dostarczała bardziej wiarygodnych wyników dotyczących liczby wysp, natomiast analiza wysp pozwalała na lepsze określenie ich sumarycznej objętości. Obie metody wyznaczania wysp i porów ujawniły swe wady i zalety, dlatego postanowiono porównać wartości parametrów wysp i porów rozpoznanych tymi sposobami.

Wyniki badań

Głównymi procesami zużycia, zachodzącymi na badanej CPS, były wykruszenia ziaren oraz ich wyrwanie ze spoiwa [8, 12]. W przypadku wyrwania ziarna ze spoiwa na mapie topografii oraz na widoku przedstawiającym pory w miejscu wyrwanego ziarna widoczne było nowe głębokie wgłębienie (rys. 6).



Rys. 6. Przykład wyrwania ziarna. U góry fragmenty map topografii dla dwóch stanów CPS związanych z różnymi etapami zużycia ściernicy, a na dole – odpowiadające im widoki głębokich wgłębień



Rys. 7. Mapy topografii fragmentów CPS o wymiarach 1 mm x 1 mm na różnych etapach zużycia ściernicy oraz odpowiadające im widoki wysp oraz porów

Na rys. 7 przedstawiono ten sam fragment powierzchni pomiarowej o wymiarach 1 mm x 1 mm po zeszlifowaniu różnych objętości materiału. Na tym samym rysunku zamieszczono też widoki wysp oraz porów, odseparowanych ze zmierzonych topografii za pomocą poziomów odcięcia. Można zauważyć, że na kolejnych etapach pracy ściernicy na jej czynnej powierzchni było coraz mniej ścierniwa, co objawiało się mniejszą liczbą wysp i ich mniejszą wysokością.

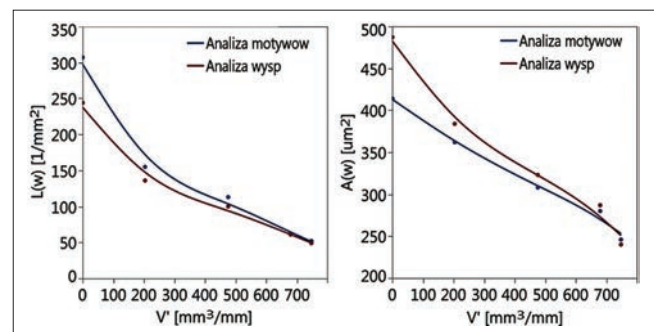
Porównanie metod rozpoznawania wysp i porów

Porównanie metod analizy wysp i motywów w kontekście rozpoznawania wysp i porów przeprowadzono na podstawie wysp, tj. obszarów ponad ustalonym poziomem odcięcia, odpowiadających ziarnom ściernym.

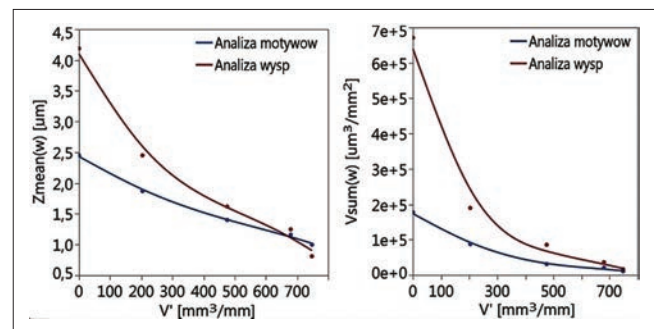
Na wykresach zamieszczonych na rys. 8 widać, że w przypadku analizy motywów rozpoznawana była większa liczba wysp $L(w)$, co skutkowało mniejszym średnim polem powierzchni wysp $A(w)$ niż w przypadku analizy wysp. Średnia wartość średnich wysokości wysp $Z_{mean}(w)$ oraz całkowita objętość wysp $V_{sum}(w)$ były większe w przypadku analizy wysp (rys. 9).

Było to spowodowane tym, że w analizie wysp ich parametry wysokościowe były obliczane względem zastosowanego wcześniej poziomu odcięcia, natomiast w przypadku analizy motywów minimalna wysokość punktów należących do motywu nie musiała się pokrywać z tym poziomem odcięcia. Wysokość motywu mogła być zatem mniejsza, niż gdyby była obliczana od zastosowanego wcześniej poziomu odcięcia.

Największe różnice pomiędzy efektami zastosowania porównywanych metod były widoczne w przypadku analizy topografii ściernicy nowej ($V' = 0 \text{ mm}^3/\text{mm}$) i na ogół zmniejszały się wraz ze zużyciem CPS. Większe różnice zaobserwowano dla parametrów wysokościowego $Z_{mean}(w)$ i objętościowego $V_{sum}(w)$ niż dla parametru poziomego $A(w)$ oraz liczby wysp $L(w)$.



Rys. 8. Porównanie liczby wysp $L(w)$ oraz średniej powierzchni wysp $A(w)$, wyznaczonych metodami analizy motywów oraz analizy wysp



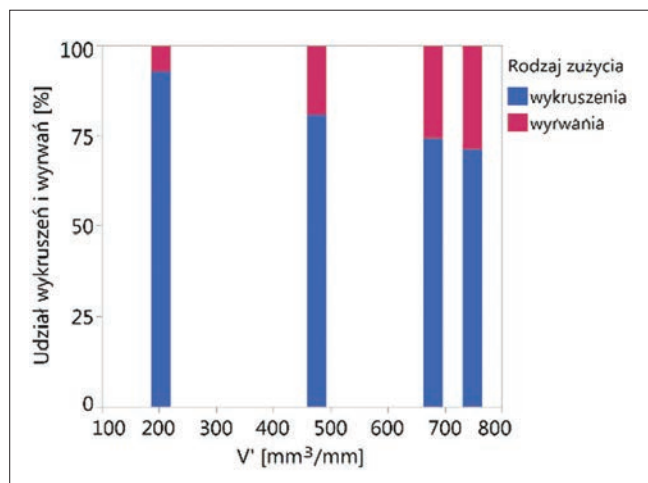
Rys. 9. Porównanie średniej wartości średnich wysokości wysp $Z_{mean}(w)$ oraz sumarycznej objętości wysp $V_{sum}(w)$, wyznaczonych metodami analizy motywów oraz analizy wysp

Na nowej ściernicy za pomocą analizy motywów rozpoznanych zostało o 26% więcej ziaren, a ich średnia powierzchnia była o 18% mniejsza niż w metodzie analizy wysp. Względna różnica parametru $Z_{mean}(w)$ wynosiła 71%, a $V_{sum}(w)$ – aż 279%.

Biorąc pod uwagę opisane badania porównawcze, uznano, że rozpoznawanie wysp i porów jest obciążone mniejszymi błędami w przypadku zastosowania metody analizy wysp. Założono, że analiza motywów dostarczała wiarygodniejsze wyniki dotyczące liczby wysp, natomiast analiza wysp pozwalała na lepsze określenie ich sumarycznej objętości. W przypadku analizy wysp błąd w wyznaczaniu ich liczby był mniejszy niż błąd w wyznaczaniu sumarycznej objętości z wykorzystaniem analizy motywów.

Ponieważ według danych producenta grubość warstwy spoiwa wynosiła 50÷60% średniej wielkości ziarna, przyjęto, że 45% objętości ziarna znajdowało się ponad spoiwem. Założono, że po wyrwanym ziarnie pozostawało w spoiwie wgłębienie, którego objętość wynosiła 55% objętości ziarna. Na tej podstawie, znając różnicę objętości porów wyznaczoną dla dwóch stanów ściernicy, można było określić objętość ścierniwa zużytego na skutek wyrwania ziaren [13]. Pozostały ubytek ścierniwa przypisano wykruszeniom.

Wizualna analiza map topografii oraz zdjęć powierzchni replik wykazała, że w całym okresie trwałości ściernicy dominującym procesem zużycia było wykruszanie się ziaren cBN. Badania ilościowe, przeprowadzone na podstawie wyznaczonych parametrów SGP CPS, potwierdziły, że wraz ze wzrostem objętości usuniętego materiału wzrastał udział wyrwań. Po osiągnięciu właściwego ubytku materiału $V' = 204 \text{ mm}^3/\text{mm}$ proporcje wykruszeń do wyrwań wynosiły 93% do 7%, natomiast na końcu badań – 71% do 29% (rys. 10).



Rys. 10. Udział objętościowy różnych rodzajów zużycia ziaren w zależności od właściwego ubytku szlifowanego materiału V'

Podsumowanie

Topografia CPS wpływa na interakcje pomiędzy ściernicą a obrabianym przedmiotem podczas procesów szlifowania. Jest to więc jeden z kluczowych czynników, decydujących o przebiegu i efektach procesu szlifowania.

Badania mające na celu ilościową ocenę topografii ściernicy nie są łatwe do przeprowadzenia. Wymagają dobrania optymalnego przyrządu pomiarowego, pozwalającego na odwzorowanie mikrogeometrii ściernicy, a następnie odpowiedniego przetworzenia danych pomiar-

rowych i obliczenia parametrów ilościowych. Najlepiej, gdyby wyznaczane parametry można było łatwo zinterpretować i w prosty sposób powiązać z różnymi elementami ściernicy. Przykładem takich parametrów są parametry ziaren ściernych znajdujących się na CPS, np. wysokość lub objętość ziaren.

W ramach badań prowadzonych z wykorzystaniem programu MountainsMap Premium 7.4 przetestowano dwie metody rozpoznawania wysp i porów na zmierzonych topografiach, tj. analizę wysp oraz analizę motywów. Niezależnie od zastosowanej metody zmiany analizowanych parametrów wysp na skutek zużycia ściernicy miały podobny charakter. W przypadku nowej ściernicy, czyli przed rozpoczęciem szlifowania, odnotowano jednak znaczące różnice wartości liczbowych parametrów wysp rozpoznanych za pomocą obu metod. Do dalszych badań zużycia CPS wybrano metodę analizy wysp, która była obciążona mniejszym błędem wyznaczania objętości ścierniwa.

Na podstawie przeprowadzonych badań zużycia ściernicy ustalono, że w całym okresie trwałości ściernicy dominującym procesem zużycia było wykruszanie się ziaren cBN. Wraz ze wzrostem objętości usuniętego materiału zmniejszał się udział objętościowy wykruszeń i tym samym zwiększał się udział objętościowy wyrwań.

LITERATURA

- Deja M. „Szlifowanie jednostronne z wykorzystaniem ściernic o spoiwie galwanicznym”. *Mechanik*. 8–9/2015: s. 84–89.
- Malkin S., Guo C. „Grinding Technology: The Way Things Can Work: Theory and Applications of Machining with Abrasives”. New York: Industrial Press, 2008.
- Inasaki I. i in. „4 Grinding, Handbook of Ceramic Grinding & Polishing”. Red. D. Marinescu. Norwich, New York: William Andrew Publishing, 1999, s. 190–323.
- Ding W., Xu J., Chen Z., Su H., Fu Y. “Wear behavior and mechanism of single-layer brazed CBN abrasive wheels during creep-feed grinding cast nickel-based superalloy”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 51 (2010): s. 541–550.
- Salmon S.C. “Grinding is hightech”. *Manufacturing Engineering*. 143 (2009): s. 53–59.
- Zhi G. i in. “The measurement and analysis of micro bonding force for electroplated CBN grinding wheels based on response surface methodology”. *Engineering Failure Analysis*. 57 (2015): s. 377–388.
- Bazan A., Kawalec A. „Metody opisu topografii powierzchni ściernic”. *Mechanik*. 8–9 (2013): s. 28–37.
- Kacalak W., Tandecka K., Lipiński D., Szafranec F., Socha E. „Metody identyfikacji zmian stanu czynnej powierzchni ściernic w wyniku starcia, zalepiania lub wykruszania ziaren”. *Mechanik*. 8–9 (2014): s. 193–199.
- Kawalec A., Bazan A., Krok M. „Wpływ prędkości szlifowania na zużywanie się ściernicy z nasypem z cBN, ze spoiwem nanoszonym galwanicznie”. *Mechanik*. 8–9 (2017): s. 690–692.
- www.digitalsurf.com (dostęp: 18.05.2018 r.).
- Wojnar L., Majorek M. „Komputerowa analiza obrazu”. Kraków: FotobitDesign, 1994.
- Shi Z., Malkin S. “An investigation of grinding with electroplated CBN wheels”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 52 (2003): s. 267–270.
- Kawalec A., Bazan A. „Ilościowy opis form zużycia jednowarstwowych ściernic z cBN, pracujących z różnymi prędkościami”. *Mechanik*. 10 (2018): s. 803–805.