

# Metody wyodrębniania ziaren z topografii czynnej powierzchni ściernicy jednowarstwowej

## Methods of grain separation from single-layer grinding wheel topography

ANNA BAZAN  
ANDRZEJ KAWALEC\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.164>

Zaprezentowano wyniki badania metod rozpoznawania ziaren na podstawie zmierzonych danych, reprezentujących topografię jednowarstwowej ściernicy. Metody te uwzględniają informację dotyczącą wyznaczonego poziomu odcięcia (metoda *Threshold*) lub odnoszącą się do segmentacji wododziałowej. Ponadto zaproponowano sposób wyznaczania średniego poziomu spoiwa.

**SŁOWA KLUCZOWE:** topografia ściernic, zużycie ściernic, analiza wzniesień i porów

*The paper presents results of research concerning methods used for determining grain separation from measured data representing single-layer grinding wheel topography. The methods apply information concerning determined threshold level (Threshold method) or concerning watershed segmentation (Watershed method). A method for determining the average level of bond was also proposed.*

**KEYWORDS:** grinding wheel topography, grinding wheel wear, particle and pore analysis

Topografia ściernicy ma wpływ na warunki jej kontaktu z przedmiotem obrabianym, a więc oprócz innych czynników (np. parametrów nastawnych procesu) decyduje o przebiegu szlifowania. Podczas obróbki topografia ściernicy nieustannie się zmienia na skutek zużycia [1]. Zmiany te, w zależności od ich charakteru i intensywności, mogą prowadzić do uzyskiwania różnych efektów szlifowania. Przykładowo wielu autorów opisywało zmniejszanie się chropowatości powierzchni szlifowanej (parametrów  $R_a$  i  $R_z$ ) wraz ze zużywaniem się ściernic jednowarstwowych [2, 3]. Wskutek zużycia ziarna ściernic stawały się mniej ostre (zwiększała się powierzchnia spłaszczeń) i kształtowały powierzchnię bardziej wygładzoną [4–6]. Podczas pracy ściernicy ujawniane były kolejne ziarna aktywne, co również przyczyniało się do zmniejszenia chropowatości szlifowanych przedmiotów.

Badania zużycia ściernic mają duże znaczenie w kontekście efektywnego stosowania tych narzędzi ściernych. Dotyczy to zwłaszcza ściernic jednowarstwowych. Ich potencjał skrawny jest związany tylko z jedną warstwą ścierniwa supertwardego, a właściwości skrawnych nie można przywrócić w procesie obciążania ściernicy.

W przypadku badań zużycia ściernic istotne jest opisanie tego zjawiska w sposób ilościowy [7–9]. Jedną z metod opiera się na wyznaczeniu parametrów topografii czynnej powierzchni ściernicy (CPS) i określeniu, jak te parametry zmieniają się w okresie trwałości ściernicy.

Współczesne programy do analizy danych pomiarowych topografii powierzchni, np. SPIP firmy Image Metrology [10] lub MountainsMap firmy DigitalSurf [11], mają moduły do analizy wysp (cząstek) i porów, więc mogą posłużyć do obliczenia parametrów ziaren ściernych [1]. Obliczenia te wymagają jednak wstępnego określenia wybranych parametrów, co stanowi osobne zadanie.

W celu obliczenia parametrów ziaren na zmierzonej topografii najpierw muszą zostać rozpoznane obszary – wyspy, które im odpowiadają. Z punktu widzenia tworzenia opisu zużycia ściernicy korzystne jest, gdy jedna wyspa odpowiada tylko jednemu ziarnu. Parametry wysp, np. ich wysokość lub objętość, są wyznaczane w stosunku do powierzchni (poziomu) odcięcia. Aby móc prześledzić zmianę parametrów wysp w okresie trwałości ściernicy, czyli na różnych etapach jej zużycia, powierzchnia odcięcia powinna przebiegać w przybliżeniu na tym samym poziomie. Innymi słowy, dla danego ziarna na różnych etapach zużycia płaszczyna odcięcia musi się znajdować w tym samym miejscu.

W artykule zaprezentowano możliwości programu SPIP 6.4.2 w zakresie wyodrębniania ziaren ze zmierzonych topografii, a także metodę obliczania poziomu odcięcia na różnych etapach zużycia ściernicy jednowarstwowej.

### Przedmiot badań

Przedmiotem badań była topografia czynnej powierzchni ściernicy jednowarstwowej z nasypem z cBN o numerze ziarna B35 na różnych etapach zużycia. Spoiwo ściernicy było niklowe, nakładane metodą galwaniczną. Grubość warstwy spoiwa wynosiła  $50\pm 60\% \cdot d_g$ . Ściernica miała kształt stożkowy, o kącie stożka  $140^\circ$  i średniej średnicy aktywnej powierzchni równej 87,2 mm. Ściernica szlifowała stal wysokostopową Pyrowear 53 o twardości powyżej 81 HRA aż do całkowitego zużycia narzędzia, co objawiało się intensywnym wzrostem siły szlifowania. Ściernica pracowała z prędkością szlifowania równą 27,4 m/s, prędkością posuwu 4250 mm/min i głębokością szlifowania 20  $\mu\text{m}$ .

Topografię ściernicy odwzorowywano za pomocą replik, które wykonano z wykorzystaniem systemu RepliSet firmy Struers. Materiałem replik była guma silikonowa barwy czarnej, o możliwościach reprodukcji szczegółów powyżej 0,1  $\mu\text{m}$ .

Do pomiarów topografii replik odwzorowujących CPS użyto mikroskopu InfiniteFocus firmy Alicona z obiektywem  $\times 20$ . Topografię CPS zmierzono pięciokrotnie, tj. przed rozpoczęciem szlifowania, a także po osiągnięciu właściwego ubytku materiału  $V'$  wynoszącego 204, 476, 670 oraz 680  $\text{mm}^3/\text{mm}$ . Na każdym etapie zużycia zmierzono sześć tych samych obszarów CPS o wymiarach 2,25 mm  $\times$  2,50 mm.

Przetwarzanie danych pomiarowych wraz z wyodrębnianiem ziaren i wyznaczeniem ich parametrów prowadzono w programie SPIP 6.4.2. Program MountainsMap Premium 7.4 również jest wyposażony w moduł do analizy wysp, lecz zawiera mniej funkcji przydatnych w prowadzonych badaniach.

### Metody wyodrębniania ziaren

W oprogramowaniu SPIP 6.4.2., w module Particle & Pore do wyznaczania parametrów wysp i porów (wzniesień i wgłębień) elementy te mogą być rozpoznawane na podstawie poziomu odcięcia *Threshold* lub segmentacji

\* Mgr inż. Anna Bazan (abazan@prz.edu.pl), dr hab. inż. Andrzej Kawalec (ak@prz.edu.pl) – Politechnika Rzeszowska

wododziałowej *Watershed* [1]. Do testów mających na celu wyłonienie najlepszej metody i parametrów odseparowania ziaren wybrano trzy mapy topografii ściernicy na różnych etapach zużycia i o różnym stopniu zalepień.

W pierwszej kolejności ewaluacja jakości separacji ziaren od spoiwa opierała się na wizualnej ocenie wyników. Następnie wyznaczano takie parametry, jak liczba, procentowy udział powierzchniowy oraz sumaryczna objętość wysp oraz wartość średnia z maksymalnych wysokości wysp. Sprawdzano, jak te parametry zmieniały się wraz ze zużyciem ściernicy w odniesieniu do ściernicy nowej.

Na podstawie oceny wizualnej map topografii można było określić, czy na CPS występowało zużycie na skutek ścierania i/lub mikrowykruszania ziaren, wrywania ich ze spoiwa oraz makrowykruszania, a także powstawania zalepień. Ścieranie i/lub mikrowykruszanie ziaren prowadzi do zmniejszania ich wysokości, a zatem do zmniejszania objętości wysp i ich średniej maksymalnej wysokości. Wrywanie ziaren ze spoiwa oraz makrowykruszanie powoduje zmniejszenie liczby, procentowego udziału powierzchniowego i sumarycznej objętości wysp. Zalepień przede wszystkim zwiększają sumaryczną objętość wysp. Na podstawie dominujących procesów zużycia i ich intensywności na analizowanych topografiach można było ocenić wiarygodność wyników wyodrębniania ziaren.

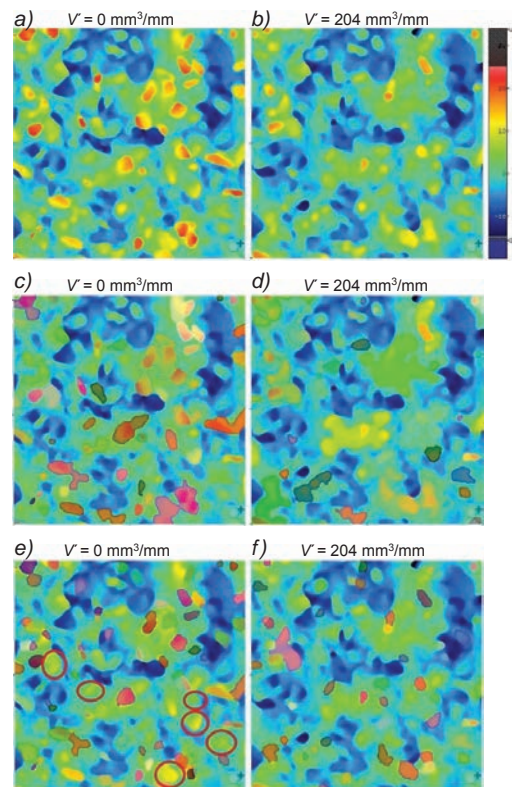
Najlepsze rezultaty wyodrębniania ziaren ze zmierzonej topografii uzyskano dzięki wyznaczaniu poziomu odcięcia (metoda *Threshold*) w sposób automatyczny. Parametry uwzględniające informacje wysokościowe, np. maksymalna wysokość ziaren lub ich objętość, są wyznaczane w odniesieniu do poziomu „zero”, który automatycznie może być wyznaczany w płaszczyźnie średniej profilu 3D, na wysokości najmniejszej lub najczęściej występującej rzędnej. W badaniach przyjęto jako poziom odniesienia wartość dominantną, ponieważ była ona związana z warstwą spoiwa oraz nie zależała od liczby i wysokości wzniesień i wgłębień, które zmieniały się na skutek zużycia.

Wadą automatycznego wyznaczania poziomu odcięcia jest brak możliwości odseparowania ziaren położonych blisko siebie (rys. 1c i d). Zalecaną do tego metodą jest segmentacja wododziałowa (*Watershed*) (rys. 1e i f), jednak nie pozwoliła ona osiągnąć oczekiwanych rezultatów mimo wielu parametrów podziału, za pomocą których można było sterować procesem segmentacji. Zależnie od przyjętych parametrów segmentacji najczęstszymi błędami były: dzielenie ziaren na kilka fragmentów, nierozpoznanie niektórych ziaren o mało stromych zboczach lub dołączanie do ziaren obszarów spoiwa.

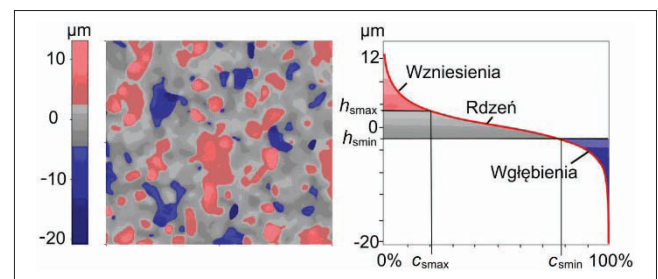
Istotną wadą obu metod było prowadzenie poziomów odcięcia wysp na różnej wysokości w zależności od stopnia zużycia CPS. Analiza topografii ściernicy nowej wskazywała bowiem, że poziom odcięcia znajdował się wyżej – że zużywały się wyższe części ziaren niż w przypadku topografii ściernicy używanej (rys. 1). Z tego powodu opracowano własny skrypt zawierający algorytm do wyznaczania poziomu, poniżej którego odrzucano punkty do dalszej analizy wysp.

### Sposób wyznaczania poziomu odcięcia wysp

W celu wyznaczenia poziomu odcięcia wysp należało najpierw obliczyć średni poziom spoiwa, czyli wartość współrzędnej pionowej, reprezentującą średnią wysokość punktów pomiarowych odpowiadających spoiwu. Poziom ten wyznaczono na podstawie następujących przesłanek, wynikających z budowy ściernicy oraz wizualnej oceny uzyskanych map topografii:



Rys. 1. Mapy 0,5 mm × 0,5 mm topografii ściernicy nowej (a) i ściernicy po osiągnięciu ubytku materiału  $V' = 204 \text{ mm}^3/\text{mm}$  oraz odpowiadające im mapy z wyspami rozpoznany za pomocą polecenia *Threshold* (c, d) oraz *Watershed* (e, f). Kolorem czerwonym zakreślono ziarna, które nie stanowią wysp (e), a zostały rozpoznane jako wyspy na kolejnym etapie badań ściernicy (f)



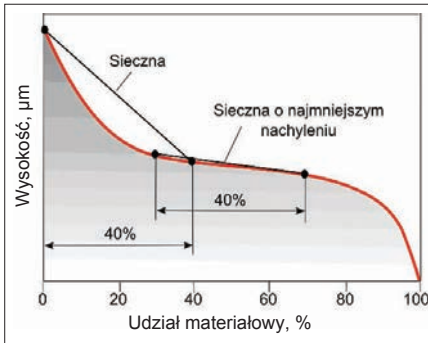
Rys. 2. Obszary ziaren, spoiwa i wgłębień w spoiwie oraz odpowiadające im pola na krzywej udziału materiałowego

- na topografiach CPS można wyróżnić trzy charakterystyczne obszary: ziarna stanowiące wyniesienia ponad spoiwem, spoiwo oraz wgłębienia w spoiwie, powstałe np. na skutek wyrwania ziaren ze spoiwa;
- na krzywej udziału materiałowego (krzywej Abbotta) ziarna stanowią w przybliżeniu obszar wzniesień, dolki w spoiwie są związane z wgłębieniami, a spoiwo stanowi rdzeń (rys. 2);
- w obszarze spoiwa różnice wysokości punktów są – w porównaniu z ziarnami i wgłębieniami po ziarnach – stosunkowo niewielkie, więc w celu wyznaczenia poziomu spoiwa należy znaleźć fragment krzywej udziału materiałowego o najmniejszym nachyleniu;
- granice pomiędzy spoiwem i ziarnami oraz spoiwem i wgłębieniami nie są wyraźne i są związane z określonymi wartościami progowymi.

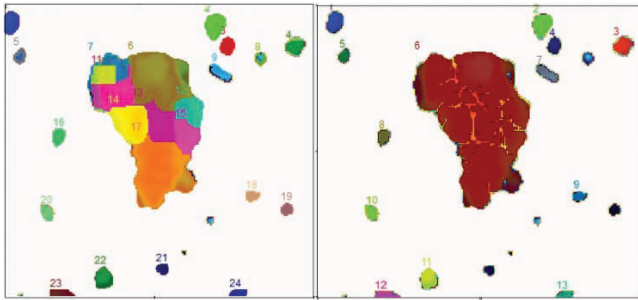
Po przeanalizowaniu 10 map topografii różnych ściernic, za pomocą których usunięto różne objętości materiału, ustalono, że spoiwo zajmuje nie mniej niż 43% zmierzonych powierzchni. Obszary ziaren i wgłębień na badanych mapach topografii zaznaczano z zapasem, aby mieć pewność, że pozostała część należy jedynie do spoiwa.

Przyjęto, że spoiwo z dużym prawdopodobieństwem zajmuje na mapach topografii więcej niż 40% powierzchni. Graniczne wartości poziomu spoiwa wyznaczono więc, poszukując na krzywej Abbotta fragmentu o rozpiętości równej 40% udziału materiałowego i siecznej tworzącej z osią odciętych najmniejszy kąt (rys. 3).

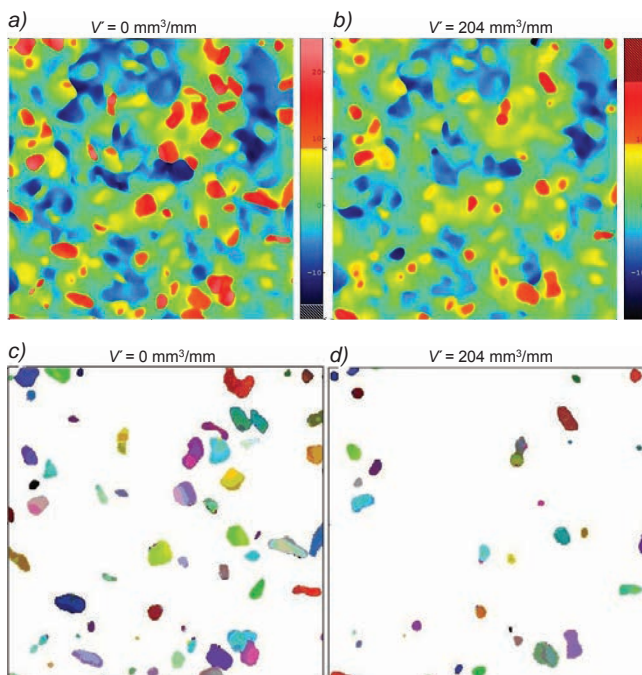
Za poziom spoiwa przyjęto średnią wysokość wszystkich punktów pomiarowych, które odpowiadają wyznaczonemu fragmentowi krzywej udziału materiałowego. Poziom odcięcia do dalszych analiz podniesiono w stosunku do średniego poziomu spoiwa o 10  $\mu\text{m}$ . Służyło to usunięciu większej liczby punktów pomiarowych odpowiadających spoiwu oraz nisko położonych części ziaren, co poprawiło jakość rozpoznawania poszczególnych ziaren.



Rys. 3. Krzywa Abbotta i sieczna o najmniejszym nachyleniu



Rys. 4. Wyodrębnienie wysp z wykorzystaniem metod *Watershed* (po lewej) oraz *Threshold* (po prawej) dla przypadku zalepienia CPS



Rys. 5. Wyspy (obszary czerwone) powyżej obliczonego poziomu odcięcia dla ściernicy nowej i używanej (a, b) oraz wyspy wyodrębnione za pomocą polecenia *Threshold* po usunięciu punktów poniżej poziomu odcięcia (c, d)

Po usunięciu z topografii punktów poniżej wyznaczonego poziomu odcięcia separacja ziaren dawała zadowalające wyniki w przypadku wykorzystania metod *Watershed* oraz *Threshold* bez automatycznego ustalania poziomu odcięcia. Znacząca różnica pojawiała się jednak w sytuacji występowania zalepień. Przykładowe wyniki segmentacji i odseparowania wysp za pomocą obu metod w przypadku zalepienia CPS przedstawiono na rys. 4. Segmentacja wododziałowa prowadziła do wyodrębnienia wielu wysp w obszarze jednego zalepienia. W przypadku segmentacji za pomocą polecenia *Threshold* zalepienie było rozpoznawane jako pojedynczy obszar. Uznano więc, że metoda *Threshold* w odróżnieniu od segmentacji wododziałowej dawała zadowalające efekty separacji wysp. Na rys. 5 pokazano przykłady wysp wyodrębnionych za pomocą opisanej metody na ściernicy nowej i ściernicy po osiągnięciu właściwego ubytku materiału  $V' = 204 \text{ mm}^3/\text{mm}$ .

## Podsumowanie

Dostępne oprogramowanie do analizy topografii powierzchni daje możliwość automatycznego ustalania poziomu odcięcia wysp i porów. Niestety, podczas analizy topografii CPS na różnych etapach zużycia narzędzia, przeprowadzonej w dwóch testowanych programach, zauważono, że poziom odcięcia nie był stały, przez co wyznaczone parametry wysp nie były obliczane od tej samej powierzchni bazowej w całym okresie trwałości ściernicy. Z tego powodu opracowano własny algorytm do wyznaczania poziomu odcięcia wysp. Po usunięciu punktów pomiarowych, znajdujących się poniżej poziomu odcięcia, wyspy były rozpoznawane za pomocą polecenia *Threshold* i tego właśnie poziomu odcięcia.

Analogicznie można również przetworzyć zmierzone topografie CPS w celu wyznaczenia parametrów głębokich wgłębień w spoiwie, będących efektem wyrwania ziaren ze spoiwa.

Ilościowa analiza ścierniwa znajdującego się na CPS na różnych etapach zużycia ściernicy oraz analiza głębokich wgłębień mogą być podstawą do wnioskowania o zachodzących procesach zużycia, ich rodzajach, dominującej formie zużycia oraz jego intensywności.

## LITERATURA

1. Bazan A., Kawalec A., Krok M., Chmielik I. „Analiza wybranych parametrów ziaren ściernic z CBN na podstawie pomiarów topografii”. *Mechanik*. 87, 8–9 (2014): s. 49–52.
2. Aspinwall D. i. in. „Profiled superabrasive grinding wheels for the machining of a nickel based superalloy”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 56, 1 (2007): s. 335–338.
3. Shi Z., Malkin S. „Wear of electroplated CBN grinding wheels”. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 128, 1 (2005): s. 110–118.
4. Shi Z., Malkin S. „An investigation of grinding with electroplated CBN wheels”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 52, 1 (2003): s. 267–270.
5. Hwang T.W., Malkin S., Evans C.J. „High speed grinding of silicon nitride with electroplated diamond wheels. Part 2: Wheel topography and grinding mechanisms”. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 122, 1 (1999): s. 42–50.
6. Upadhyaya R., Fiecoat J. „Factors affecting grinding performance with electroplated CBN wheels”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 56, 1 (2007): s. 339–342.
7. Bazan A., Kawalec A. „Topografia czynnej powierzchni ściernicy z CBN ze spoiwem galwanicznym”. *Mechanik*. 86, 8–9 (2013): s. 38–45.
8. Kawalec A., Bazan A., Krok M., Chmielik I. „Porównanie wyników badań stykowych dotyczących parametrów topografii CPS ściernic z CBN zmieniających się wraz z jej zużyciem”. *Mechanik*. 87, 8–9, CD (2015): s. 190–193.
9. Kacalak W., Tandecka K., Lipiński D., Szafranec F., Socha E. „Metody identyfikacji zmian stanu czynnej powierzchni ściernicy w wyniku starcia, zalepienia lub wykruszania ziaren”. *Mechanik*. 87, 8–9 (2014): s. 193–199.
10. www.imagejet.com (dostęp: 18.05.2018 r.).
11. www.digitalsurf.com (dostęp: 18.05.2018 r.).