

# Ilościowy opis form zużycia jednowarstwowych ściernic z cBN, pracujących z różnymi prędkościami szlifowania

## Quantitative description concerning wear forms of cBN single-layer grinding wheels working with different grinding speeds

ANDRZEJ KAWALEC  
ANNA BAZAN\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.134>

Zaprezentowano metodę ilościowego opisu zaobserwowanych form zużycia czynnej powierzchni ściernicy z cBN ze spoiwem nanoszonym metodą galwaniczną. Wyznaczono objętość ścierniwa, które w wyniku pracy ściernicy zostało wykruszone, wyrwane oraz zalepione. Badaniom poddano trzy ściernice pracujące z różnymi prędkościami szlifowania.  
**SŁOWA KLUCZOWE:** topografia ściernicy, zużycie ściernicy, ściernica jednowarstwowa

*The paper presents a method of quantifying the observed wear forms of electroplated cBN grinding wheel. The volume of fractured, pulled out or smeared abrasive was determined. Three grinding wheels working with different grinding speeds were tested.*

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

Wiedza na temat form zużycia czynnej powierzchni ściernicy (CPS) pozwala na lepsze zrozumienie zjawisk zachodzących na ściernicy podczas jej pracy. Ocena jakościowa i ilościowa zużycia ściernic wymaga jednak zastosowania różnych metod kwantyfikacji danych i ich dalszej analizy. Metody te mogą uwzględniać dane dwu- lub trójwymiarowe, uzyskane z obserwacji/pomiaru CPS. Ze względu na dużą ilość danych ich analiza powinna być oparta na metodach komputerowych.

Badania dotyczące różnych form zużycia CPS najczęściej bazują na wizualnej ocenie ziaren ściernych, spoiwa oraz wolnej przestrzeni na CPS. Do tego potrzebne są obrazy 2D CPS pod odpowiednim powiększeniem, otrzymane w badaniach mikroskopowych, np. na mikroskopach optycznych lub mikroskopach sił elektronowych (SEM). Dzięki dobrej jakości obrazom 2D CPS badacz, który dysponuje wiedzą i doświadczeniem, może rozpoznać różne formy zużycia CPS. Jest to jednak tylko informacja jakościowa dotycząca procesów zużycia, jakim uległa ściernica. Ocena ilościowa jest już bardziej wymagająca i zależy od budowy oraz form zużycia ściernicy.

Podczas analizy obrazów mikroskopowych użytkownik samodzielnie może zliczyć ziarna, które uległy różnym rodzajom zużycia [1–5]. Jest to metoda dokładna, lecz bardzo czasochłonna, przez co obszar analizy jest zazwyczaj niewielki. Z tego względu do rozpoznawania i kwantyfikowania różnych form zużycia na podstawie obrazów 2D często wykorzystuje się również metody analizy obrazu. W ten sposób można określić m.in. powierzchnię starc na ziarnach [2, 6] oraz udział zalepień [6].

Koncepcję ilościowej oceny form zużycia na podstawie danych 3D z pomiarów topografii przedstawiono m.in. w artykułach [7, 8]. Zakłada ona detekcję obszarów płaskich. W zależności od ich wielkości są one skategoryzowane jako zalepienia lub starcia.

Metody komputerowe w porównaniu z metodami opartymi wyłącznie na pracy badacza mogą być mniej dokładne (ze względu na nieuniknione błędy automatycznej analizy obrazów – w przypadku ściernic ta analiza jest skoncentrowana na rozpoznawaniu ziaren i spoiwa), za to pozwalają na szybką, automatyczną analizę większych obszarów CPS i obliczenie większego zbioru parametrów. Podobnie większe możliwości analizy w porównaniu z metodami bazującymi na danych 2D dają metody uwzględniające trójwymiarowe informacje o CPS.

Przedstawione w artykule podejście do określania ilości ścierniwa, które uległo określonym formom zużycia, zakłada pomiar topografii ściernicy. Tak jak w badaniach opisanych w [7] zalepienia odróżniano od ziaren na podstawie ich powierzchni. Dodatkowo można było wyznaczyć objętość ścierniwa wykruszonego oraz wyrwanego ze spoiwa. Podczas badań sprawdzono, jak udział poszczególnych form zużycia CPS zależy od prędkości szlifowania  $v_s$ .

### Przedmiot i metodyka badań

Przedmiotem badań była topografia czynnej powierzchni trzech ściernic jednowarstwowych z nasypem z cBN o numerze ziarna B35 (średnia wielkość ziarna  $d_g = 35 \mu\text{m}$ ) na różnych etapach zużycia ściernic. Niklowe spoiwo ściernic zostało nałożone na rdzeń ściernicy metodą galwaniczną. Grubość warstwy spoiwa wynosiła  $50 \pm 60\% \cdot d_g$ . Ściernice miały kształt stożkowy, o kącie stożka  $140^\circ$  i średniej średnicy aktywnej powierzchni równej  $87,2 \text{ mm}$ .

Obrobiane przedmioty wykonano ze stali wysokostopowej o twardości powyżej 81 HRA. Każda ze ściernic pracowała z innym zestawem parametrów nastawnych. W każdym z trzech przypadków prędkość posuwu oraz głębokość szlifowania wynosiły  $v_w = 4250 \text{ mm/min}$  i  $a_s = 20 \mu\text{m}$ , natomiast w zależności od ściernicy prędkość szlifowania  $v_s$  ustawiano na poziomie: 18,3 m/s (w przypadku ściernicy S1), 27,4 m/s (w przypadku ściernicy S2) oraz 36,5 m/s (w przypadku ściernicy S3).

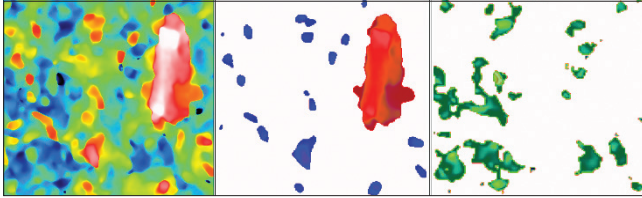
Topografię ściernic odwzorowano za pomocą replik z gumy silikonowej (dającej możliwości reprodukcji szczegółów powyżej  $0,1 \mu\text{m}$ ) o czarnej barwie, wykonanych z użyciem systemu RepliSet firmy Struers. Do pomiarów topografii replik odwzorowujących CPS wykorzystano mikroskop InfiniteFocus firmy Alicona z obiektywem  $\times 20$ . Rozdzielczość pionowa pomiaru wynosiła  $0,1 \mu\text{m}$ .

Na różnych etapach zużycia danej ściernicy zmierzono sześć tych samych (w przybliżeniu) obszarów CPS o wymiarach  $2,25 \text{ mm} \times 2,50 \text{ mm}$ .

Przetwarzanie danych pomiarowych wraz z wyodrębnieniem obszarów wysp, odpowiadających ziarnom i zalepieniom, oraz porów, a także wyznaczanie ich parametrów odbyło się w programie SPIP 6.4.2. Metodykę wyodrębniania wysp i porów przedstawiono w artykule [9]. Odróżnienie ziaren od zalepień opierało się na analizie pola powierzchni wyspy. Za zalepienie uznawano wyspę

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

o powierzchni większej lub równej  $2500 \mu\text{m}^2$  – w przeciwnym razie wyspę uznawano za obszar odpowiadający ziarnu ściernemu (rys. 1). Graniczną wartość różnicującą ziarna i zalepienia przyjęto na takim poziomie, ponieważ na każdej spośród wszystkich badanych topografii ściernic nowych co najmniej 99% ziaren miało powierzchnię mniejszą niż  $2500 \mu\text{m}^2$ .



Rys. 1. Przykładowy fragment ( $0,5 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$ ) zmierzonej powierzchni CPS (po lewej) oraz wyodrębnione z niego obszary wysp (w środku) i porów (po prawej). Na widoku przedstawiającym wyspy czerwony obszar odpowiada zalepieniu CPS, a niebieski – ziarnom

### Wyznaczanie objętościowego procentowego udziału poszczególnych form zużycia CPS

Wizualna ocena zdjęć replik CPS oraz map topografii pozwoliła ustalić, że zmiany CPS w okresie trwałości ściernic były związane głównie z trzema rodzajami zużycia [10]: wykuszaniem się ziaren, wyrrywaniem ziaren ze spoiwa oraz zalepieniem CPS.

Parametry wysp, porów i zalepień posłużyły do obliczenia procentowego udziału poszczególnych rodzajów zużycia. Na podstawie znanej objętości ścierniwa na CPS, wyrażonej parametrem  $Vsum$  (objętością ziaren przypadającą na jednostkę powierzchni CPS) – na różnych etapach pracy ściernicy (tj. po usunięciu różnej objętości materiału) i na ściernicy nowej – określono ubytek ścierniwa wskutek zużycia  $dVsum$ . Tym samym znany był ubytek ścierniwa na danym etapie pracy ściernicy, będący skutkiem wszystkich rodzajów zużycia:

$$dVsum = Vwykr + Vwyrw + Vzalep \quad (1)$$

gdzie:  $dVsum$  [ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ] – całkowity ubytek ścierniwa na danym etapie pracy ściernicy,  $Vwykr$  [ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ] – objętość wykuszonego ścierniwa,  $Vwyrw$  [ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ] – objętość wyrwanego ścierniwa,  $Vzalep$  [ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ] – objętość ścierniwa, które zostało zalepione.

Metodyka badań nie pozwoliła na rozróżnienie mikro- i makrowykuszeń ziaren z cBN.

Według danych producenta grubość warstwy spoiwa to  $50 \pm 60\%$  średniej wielkości ziarna, dlatego 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 podstawie różnicy objętości porów na danym etapie badań  $Vsum(p)$  oraz objętości porów na ściernicy nowej  $Vsum(p)_0$  obliczano objętość ścierniwa, które zostało wyrwane ze spoiwa (chodzi o objętość ścierniwa, która początkowo wystawała ponad poziom spoiwa):

$$Vwyrw = (Vsum(p) - Vsum(p)_0) \cdot (0,45/0,55) \quad (2)$$

Pozostało obliczyć objętość ścierniwa wykuszonego oraz zalepionego. Za ścierniwo zalepione uznawano takie ziarna, które były otoczone materiałem tworzącym zalepienie przestrzeni międzyziarnowej. Objętość ziaren zalepionych  $Vzalep$  wyznaczono w przybliżeniu na podstawie powierzchniowego udziału zalepień  $A\%(z)$  na danym etapie zużycia:

$$Vzalep = Vsum_0 \cdot A\%(z) \quad (3)$$

gdzie:  $Vsum_0$  [ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ] – objętość ścierniwa na nowej ściernicy.

Objętość ziaren wykuszonych wyznaczano po przekształceniu wzoru (3). Odnosząc objętości ziaren wykuszonych, wyrwanych i zalepionych do całkowitego ubytku ścierniwa na danym etapie pracy ściernicy  $dVsum$ , uzyskiwano procentowy udział poszczególnych rodzajów zużycia. Obliczano, ile procent ścierniwa uległo danemu procesowi zużycia.

### Wyniki badań

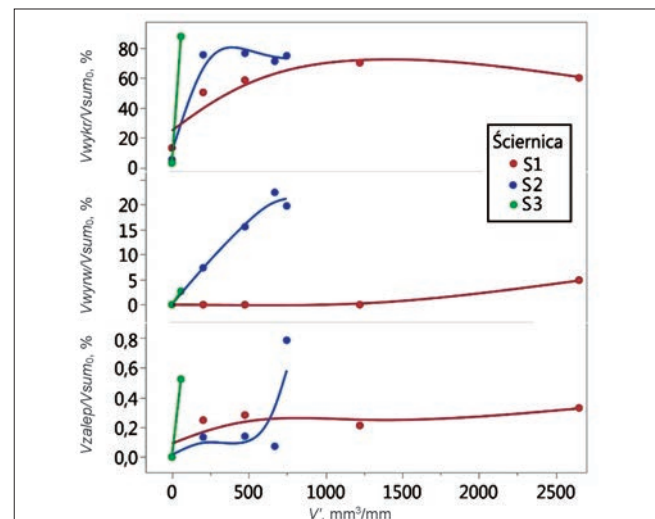
W wyniku procesów szlifowania ściernice S1 i S2, pracujące z prędkościami szlifowania równymi 18,3 m/s i 27,4 m/s, uległy całkowitemu zużyciu, co objawiało się gwałtownym wzrostem siły szlifowania [10] – ten wzrost przyjęto jako kryterium wyznaczania okresu trwałości ściernicy.

Po zaobserwowaniu wzrostu składowych siły szlifowania przerywano pracę daną ściernicą i uznawano ją za całkowicie zużytą. Całkowite zużycie ściernicy S1 nastąpiło po usunięciu właściwej objętości materiału o wielkości  $V' = 59 \text{ mm}^3/\text{mm}$  w czasie 0,7 min, a ściernicy S2 – po usunięciu objętości  $V' = 680 \text{ mm}^3/\text{mm}$  w czasie 8 min. Ściernica S3, pracująca z największą prędkością szlifowania, w trakcie badań nie uległa całkowitemu zużyciu. Ze względu na ograniczoną liczbę próbek do szlifowania badania przerwano po osiągnięciu właściwego ubytku materiału równego  $V' = 2652 \text{ mm}^3/\text{mm}$ . Czas pracy ściernicy S3 wyniósł 31,2 min.

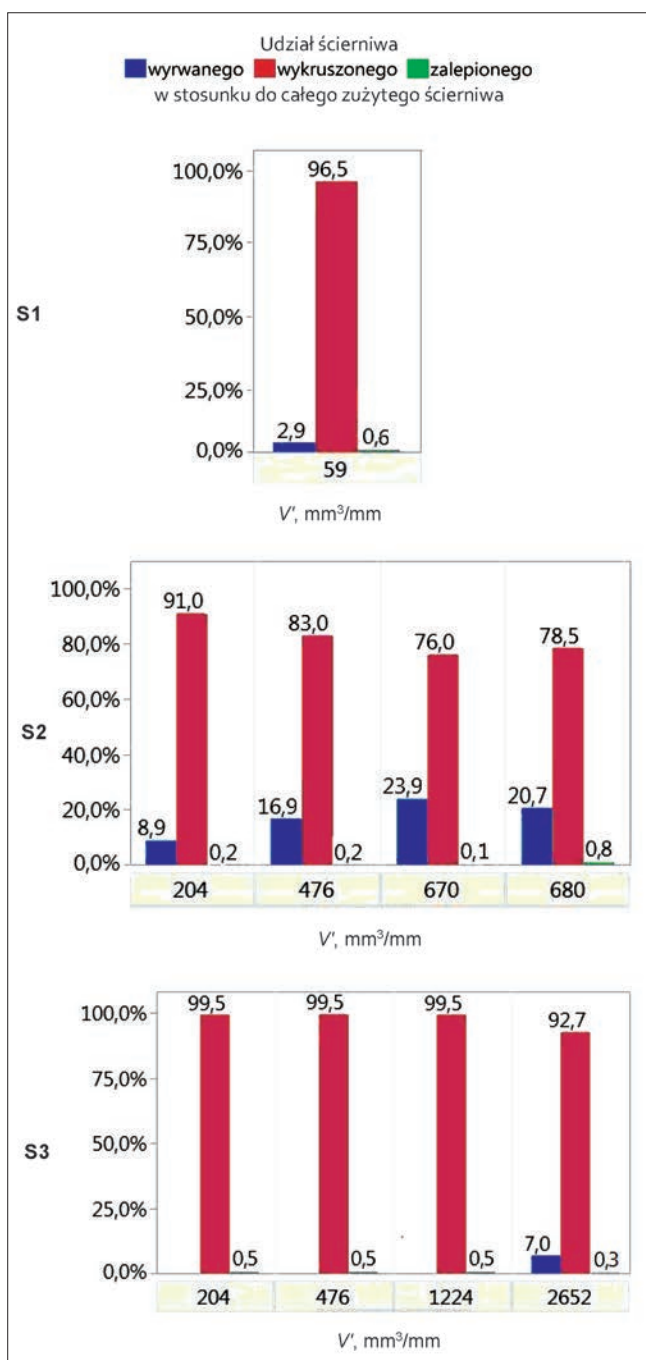
Z przytoczonych danych można wywnioskować, że prędkość szlifowania  $v_s$  istotnie wpływała na zużycie i okres trwałości ściernicy. Wzrost prędkości szlifowania wpływał na zmniejszenie zużycia ściernicy i wydłużenie okresu jej trwałości. Było to związane ze zmniejszaniem się siły szlifowania wraz ze wzrostem  $v_s$  [10].

Całkowity ubytek ścierniwa w przypadku ściernic S1 i S2, które uległy całkowitemu zużyciu, wynosił odpowiednio 94% i 91% początkowej objętości ścierniwa. Na ściernicy S3 zużyciu uległo 70% dostępnej objętości ziaren.

Na rys. 2 i 3 przedstawiono ilościowy opis form zużycia badanych ściernic.



Rys. 2. Procentowy udział objętości ścierniwa, które uległy różnym rodzajom zużycia na ściernicach S1, S2 oraz S3 po usunięciu właściwej objętości materiału  $V'$  (dla poprawy czytelności rysunku wprowadzono linie aproksymujące wartości dla S2 i S3)



Rys. 3. Procentowy udział objętości ścierniwa, które uległo różnym rodzajom zużycia na ściernicach S1, S2 oraz S3 po usunięciu właściwej objętości materiału  $V'$  w stosunku do objętości całego zużytego ścierniwa

Podczas badań najwięcej materiału ziaren, bo ponad 88%, wykruszyło się w postaci fragmentów ziaren ze ściernicy S1, pracującej z najmniejszą prędkością szlifowania. Ze ściernicy S2, która również całkowicie się zużyła, wykruszeniu uległo ok. 77% materiału ścierniwa. Objętościowy udział wyrwanego ścierniwa był największy w przypadku ściernicy S2. Objętość wykruszonych ziaren w czterech badanych stanach tej ściernicy zmieniała się nieznacznie, podczas gdy udział ścierniwa wyrwanego ze spoiwa wyraźnie wzrastał.

Potwierdzają to również wykresy na rys. 3, przedstawiające udział objętości ścierniwa, które uległo poszczególnym rodzajom zużycia, w odniesieniu do całkowitego ubytku materiału ziaren na danym etapie badania ściernicy. Niezależnie od prędkości szlifowania i objętości usuniętego materiału dominującym procesem zużycia było wykruszanie się ziaren.

W przypadku ściernic S1 i S2 więcej ścierniwa uległo wyrwaniu ze spoiwa niż zalepieniu. W przypadku ściernicy S3, pracującej z największą prędkością szlifowania, ścierniwo ulegało niemal wyłącznie wykruszaniu. Dopiero po ostatnim etapie pracy ściernicy zaobserwowano wyraźny wzrost udziału ziaren wyrwanych.

## Podsumowanie

Rodzaj zachodzących procesów zużycia wpływa na sposób kształtowania mikrogeometrii ściernicy, a zatem decyduje o właściwościach skrawnych ściernicy. Z tego powodu analiza intensywności różnych procesów zużycia może być pomocna w projektowaniu i nadzorowaniu procesów szlifowania.

Biorąc pod uwagę analizowane w artykule rodzaje zużycia, najmniej niekorzystne z punktu widzenia eksploatacji ściernicy jest wykruszanie, a zwłaszcza mikrowykruszanie się ziaren. W przypadku wyrwania ziaren CPS traci bezpowrotnie potencjał skrawny, który był związany z tymi ziarnami. Zalepienie również wiąże się z utratą właściwości skrawnych przez ziarna, które zostały niejako zasłonięte przez narost z materiału obrabianego. Ponadto pojawienie się zalepień niekorzystnie wpływa na warunki tarcia, zwiększa siłę szlifowania i temperaturę w obszarze szlifowania.

Wykruszanie ziaren powoduje ubytek materiału ściernego, więc jest zjawiskiem niekorzystnym, jednak z drugiej strony sprawia, że odsłaniane są nowe, ostre krawędzie skrawające. Mikrowykruszanie ziaren jest z punktu widzenia eksploatacji ściernicy najkorzystniejszą formą zużycia. Nie powoduje znacznej utraty ścierniwa, a jednocześnie przyczynia się do samoostrzenia ściernicy.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że prędkość szlifowania wpływa nie tylko na okres trwałości ściernicy, lecz także na intensywność różnych procesów jej zużycia. Niezależnie od prędkości szlifowania dominującym procesem zużycia CPS było wykruszanie się ziaren.

## LITERATURA

- Deja M. „Ocena stanu czynnej powierzchni ściernicy ze spoiwem galwanicznym w szlifowaniu z kinematyką docierania”. *Inżynieria Maszyn.* 18, 2 (2013): s. 45–54.
- Hwang T., Malkin S., Evans 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.
- Schoenhagen Y., Vasquez J. „Process Simulation of Mono-Layer Super Abrasive Grinding Wheels”. Worcester Polytechnic Institute, 2012.
- Shi Z., Malkin S. „An investigation of grinding with electroplated CBN wheels”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology.* 52, 1 (2003): s. 267–270.
- Shi Z., Malkin S. „Wear of electroplated CBN grinding wheels”. *Journal of Manufacturing Science and Engineering.* 128, 1 (2005): s. 110–118.
- Kapłonek W., Nadolny K. „Assessment of the grinding wheel active surface condition using SEM and image analysis techniques”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.* 35, 3 (2013): s. 207–215.
- Kacalak W. i in. „Metody identyfikacji zmian stanu czynnej powierzchni ściernic w wyniku starcia, zalepienia lub wykruszania ziaren”. *XXXVII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej.* Wrocław, 2014, s. 193–199.
- Lipiński D., Kacalak W., Tomkowski R. „Methodology of evaluation of abrasive tool wear with the use of laser scanning microscopy”. *Scanning.* 36, 1 (2014): s. 53–63.
- Bazan A., Kawalec A. „Metody wyodrębniania ziaren z topografii czynnej powierzchni ściernicy jednowarstwowej”. *Mechanik.* 10 (2018): s. 926–928.
- 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.