

## **RECENZJA**

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Bazan nt.** **"Model topografii czynnej powierzchni ściernicy z cBN** **uwzględniający jej zużycie"**

Recenzję wykonano na zlecenie Dziekana Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, dr. hab. inż. Jarosława Sępa, prof. PRz (pismo RM-530-02-03-2018) oraz Prorektora ds. Nauki, prof. dr. hab. inż. Grzegorza Budzika (umowa o dzieło nr OK-N/884/2018 z dnia 26.07.2018r.).

#### **1. CHARAKTERYSTYKA PRACY**

Rozprawa liczy łącznie 306 stron formatu A4. Podzielona jest na osiem rozdziałów uzupełnionych o wykaz ważniejszych oznaczeń, spis literatury, załącznik, spis rysunków i tablic oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem w tematykę szlifowania za pomocą ściernic borazonowych ze spoiwem wytwarzanym galwanicznie. Krótko sygnalizuje walory takich ściernic w nawiązaniu do procesu szlifowania i sygnalizuje potrzebę analizy topografii zmian czynnej powierzchni ściernicy na skutek różnych rodzajów zużycia. Krótko charakteryzuje zawartość kolejnych rozdziałów pracy informując tym samym o przyjętej koncepcji badań i sposobie ich realizacji.

Rozdział drugi w całości poświęcony jest przeglądowi literatury. Pierwsza część rozdziału podkreśla znaczenie supertwardych materiałów narzędziowych w procesach wytwarzania wyrobów. Szczegółowo charakteryzuje jeden z nich tj. regularny azotek boru (cBN) prezentując właściwości fizyko-chemiczne, rodzaje i oznaczenia ziaren oraz wady i zalety w porównaniu z innymi materiałami ściernymi. Omawia budowę ściernic jednowarstwowych oraz metody ich wytwarzania skupiając się na ściernicach ze spoiwem osadzonym galwanicznie, będących przedmiotem pracy. Dalsza część rozdziału to zagadnienia związane z przebiegiem procesu szlifowania wymienionymi ściernicami. Scharakteryzowane zostały zjawiska towarzyszące szlifowaniu, wpływ budowy ściernicy oraz parametrów technologicznych na przebieg procesu, wreszcie przebieg i formy zużycia ściernic wraz z towarzyszącymi temu zjawisku objawami. Odrębne zagadnienie tego

rozdziału, bazującego na przeglądzie literatury, to topografia powierzchni czynnej ściernicy. Omówiono tutaj metody pomiaru mikrogeometrii ściernic oraz parametry wykorzystywane do charakterystyki powierzchni roboczej ściernicy zwracając jednocześnie uwagę na znaczną ich ilość utrudniającą ocenę w kontekście zużycia.

Analiza literatury oraz wynikające z niej wnioski stały się podstawą nakreślenia celu i hipotezy pracy oraz jej zakresu, które przedstawiono w rozdziale trzecim.

Rozdział czwarty stanowi opis przygotowań do realizacji zasadniczej części pracy. W pierwszej kolejności nakreśla plan badań realizowany i prezentowany w kolejnych rozdziałach. Z uwagi na odniesienie przedmiotu badań do szlifowania uzębienia kół zębatach, na początku rozdziału została przedstawiona kinematyka ich obróbki oraz przyjęte uproszczenia, ograniczające koszty realizacji doświadczeń przy zachowaniu istoty procesu. Omówiono budowę stanowiska badawczego zbudowanego na bazie szlifierki CNC uzupełnionej o czujniki siły, emisji akustycznej oraz temperatury. Omówiono również wykorzystywane w doświadczeniach próbki, z uwagi na koszty odbiegające kształtem od obrabianych kół zębatach, jednak wykonane z tego samego materiału i poddane podobnej obróbce cieplnej. Rozdział ten zawiera omówienie istotnego zagadnienia a mianowicie zasad pomiaru topografii powierzchni czynnej ściernicy. Omówienie to zostało poprzedzone wyborem urządzenia pomiarowego w oparciu o przeprowadzone testy pomiaru topografii mikrostruktury ściernicy i ocenę jakości odtworzenia geometrii. Scharakteryzowano również sposób postępowania służący obliczeniu parametrów topografii powierzchni dla charakterystycznych elementów powierzchni ściernicy wraz z określeniem pełnego zbioru parametrów SGP weryfikowanych dalej pod kątem przydatności w monitorowaniu zużycia ściernicy. Ostatni element tego rozdziału to uzasadnienie wyboru i omówienie przyjętego planu eksperymentu określającego liczbę prób i wartości zmiennych parametrów wejściowych procesu (prędkość szlifowania, prędkość posuwu, głębokość szlifowania), jak również zastosowane narzędzia analizy statystycznej.

Rozdział piąty to badania wstępne w ramach których poddano wzorcowaniu oryginalne rozwiązanie termopary wykorzystywanej do pomiaru temperatury w trakcie badań zasadniczych. Obejmuje również pomiary głównych wymiarów ściernic oraz ich odchyłek bicia. W odniesieniu do warstwy roboczej ściernic zawiera pomiary równomierności rozłożenia ziarna ściernego wykonane na obwodzie ściernicy jak i wzdłuż tworzącej powierzchni stożkowej. Przeprowadzono również badania porównawcze topografii warstwy wierzchniej pomiędzy kolejnymi ściernicami wykorzystywanymi w eksperymencie. Ze względu na losowy charakter rozłożenia ścierniwa na powierzchni roboczej oceny dokonano w oparciu o wnioskowanie statystyczne. Wyniki analiz wskazały różnice w jednorodności powierzchni roboczej w odniesieniu do jednej jak i grupy wykorzystywanych w testach ściernic. W końcowej części rozdziału przedstawiono wyniki wstępnych prób szlifowania. Ich celem było sprawdzenie stanowiska badawczego oraz uzyskanie informacji w zakresie zmian wartości mierzonych parametrów.

Rozdział szósty zawiera prezentację uzyskanych wyników w ramach badań zasadniczych. Zawiera obserwacje i pomiary parametrów topografii powierzchni roboczej ściernic w trakcie ich eksploatacji, wskazując różnice w formach zużycia w zależności od zastosowanych parametrów technologicznych. W oparciu o wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni ściernicy oraz posługując się testami statystycznymi, spośród wielu analizowanych parametrów, dokonano selekcji celem wyboru wskaźników najbardziej wrażliwych na zużycie ściernicy. Spośród 144 parametrów wyselekcjonowano 5 jako najbardziej reprezentatywnych. Posługując się wybranymi wskaźnikami scharakteryzowano tempo zużycia ściernicy w zależności od usuniętego materiału. Z uwagi na zmienność ubytku materiału oraz czasu pracy ściernicy a przez to brak możliwości powiązania parametrów technologicznych obróbki ze zużyciem ściernicy, intensywność zużycia ściernicy przedstawiono za pomocą wskaźników średniego tempa zużycia  $dZ/dV'$  oraz  $dZ/dt$ . Przeprowadzono również analizę korelacji w/w wskaźników z innymi parametrami informującymi o zużyciu ściernicy potwierdzającą ich użyteczność. Ponieważ w trakcie badań zużycia ściernic rejestrowano wartości siły, emisji akustycznej i temperatury przedstawiono również przebiegi tych zmiennych. Istotnym elementem a zarazem efektem szlifowania jest jakość obrobionej powierzchni. Na koniec rozdziału przedstawiono i poddano analizie topografie wybranych powierzchni z pokazaniem różnic w strukturze powierzchni odpowiadających średnicy pracy narzędzia.

Rozdział siódmy, bazując na posiadanych wynikach z badań eksperymentalnych oraz przeprowadzonych analizach, poświęcony jest przygotowaniu modelu topografii czynnej powierzchni ściernicy odzwierciedlającego jej zużycie i jest odpowiedzią na cele pracy i postawioną hipotezę. W rozdziale tym opracowano kilka modeli regresyjnych określających wpływ parametrów nastawnych (prędkości szlifowania, prędkości posuwu, głębokości szlifowania) oraz właściwego ubytku materiału na parametry geometryczne czynnej powierzchni ściernicy oraz przedmiotu obrabianego jak również parametry dynamiczne w postaci siły i emisji akustycznej. Zwieńczeniem tego rozdziału jest model syntetyczny, ujmujący opracowane uprzednio modele pozwalający na uzyskanie określonych informacji odnoszących się do kontroli i nadzoru w procesach wytwarzania.

Rozdział ósmy to podsumowanie przeprowadzonych badań i opracowań w postaci modeli regresyjnych. Zawiera również wnioski wynikające z uzyskanych wyników i przeprowadzonych analiz. W rozdziale tym podkreślone są również oryginalne osiągnięcia pracy oraz propozycje dalszych badań bazujące na prezentowanym opracowaniu.

Pracę kończy spis literatury obejmujący 281 pozycji oraz załączniki prezentujące wybrane wyniki badań z poszczególnych etapów pracy.

## 2. OCENA PRACY

### 2.1. Aktualność i znaczenie podjętej tematyki

Obserwowany w ostatnich latach wzrost wydajności i dokładności obróbki jest skutkiem ciągłego rozwoju środków produkcji. Jednym ze sposobów dokładnej obróbki skrawaniem podlegającym doskonaleniu jest również szlifowanie. Złożoność zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi szlifowania wynikająca z dużej liczby ostrzy skrawających o niezdefiniowanej geometrii i losowym rozmieszczeniu, podlegających dynamicznym zmianom w trakcie realizacji procesu sprawia, że w obszarze tym trwają ciągłe badania. Dotyczą one ulepszania nowych i konwencjonalnych materiałów ściernych i spoiw oraz technologii ich wytwarzania. Dotyczą również efektywnego wykorzystania narzędzi ściernych w obróbce materiałów trudno obrabialnych, uzyskaniu wysokiej dokładności kształtowo-wymiarowej i chropowatości powierzchni przedmiotów obrabianych, czy zapewnienia wysokiej wydajności szlifowania przy zachowaniu niskich kosztów, powtarzalności wyników szlifowania oraz niezawodności procesu obróbki.

Aktualnie wśród stosowanych narzędzi ściernych dominują narzędzia z materiałów konwencjonalnych. Ich stosowanie w większości przypadków jest uzasadnione ekonomicznie. Obserwuje się jednak wzrost udziału narzędzi z supertwardych materiałów ściernych, takich jak: diament naturalny, diament syntetyczny i regularny azotek boru (cBN). Szczególną grupę wśród wymienionych narzędzi stanowią ściernice borazonowe ze spoiwem wytwarzanym metodą galwaniczną. Elektrolityczne nakładanie spoiwa daje możliwość produkcji jednowarstwowych ściernic kształtowych o dużej powtarzalności. Z kolei, właściwości borazonu w postaci wysokiej twardości, odporności na zużycie i wysoką temperaturę, wyższej przewodności cieplnej w porównaniu z konwencjonalnymi materiałami ściernymi, mają korzystny wpływ na proces szlifowania ograniczając zjawisko przypaleń. Wymienione zalety, stwarzają możliwości realizacji bardzo dokładnej i wydajnej obróbki ścierniej bez obciążania ściernicy. Jednym z zastosowań tego typu obróbki jest kształtowe szlifowanie utwardzonego uzębienia kół zębatych do którego nawiązuje recenzowana praca. W przypadku uzębienia zewnętrznego, dzięki ściernicom borazonowym uzyskuje się zwiększenie wydajności w stosunku do konwencjonalnych metod obróbki obwiedniowej. Zalety ściernic borazonowych widoczne są szczególnie w obróbce uzębienia wewnętrznego, gdzie klasyczne metody obwiedniowe nie znajdują zastosowania a dokładność uzębienia wymaga trwałości zarysu małego narzędzia. Rozwodząc się nad zaletami ściernic borazonowych należy również wspomnieć o wysokich ich kosztach, znacznie przekraczających koszty ściernic konwencjonalnych. Stąd też, wymierne korzyści z ich stosowania można uzyskać maksymalnie ich potencjał obróbkowy, w efekcie czego, stosując droższe narzędzia, uzyskuje się relatywnie niższe koszty produkcji. W praktyce jednak, nie zawsze występuje efektywne wykorzystywanie tych narzędzi. Wynika to często z braku wiedzy na temat procesu ich zużycia w

określonych zastosowaniach W grę wchodzi również obawa przed stratami w końcowym etapie wytwarzania drogiego wyrobu, wynikającymi z błędnego wykonania operacji szlifowania, skutkujące jego zabrakowaniem.

Z technologicznego punktu widzenia znajomość czynników mających wpływ na przebieg szlifowania a zarazem zapewniających maksymalną wydajność procesu, przy jednoczesnym spełnieniu wymagań dokładnościowych wykonania wyrobu z trwałością ściernicy dopasowaną do zadania obróbkowego, jest niezmiernie istotna. Stąd też, lepsze rozpoznanie zjawisk występujących w procesie szlifowania z wykorzystaniem ściernic borazonowych, pomimo istnienia wielu opracowań, nadal wymaga zainteresowania badawczego. Tak więc, Doktorantka wybrała ważny i aktualny temat.

## **2.2. Realizacja badań i uzyskane wyniki**

Oceniając realizację badań należy zauważyć logicznie i rzetelnie opracowany plan. Obejmuje on przygotowanie stanowiska i przedmiotu badań, badania wstępne i zasadnicze, analizę i praktyczne wykorzystanie wyników. Uwagę zwraca stanowisko badawcze pozwalające nie tylko na prowadzenie obróbki ale również pomiar wielkości towarzyszących szlifowaniu. Oryginalnym rozwiązaniem jest pomiar temperatury za pomocą termopary dopasowanej do badanej próbki i wykorzystującej jej właściwości. Również przemyślany jest kształt próbek, głęboko zahartowanych, służący ograniczeniu strat materiału obrabianego, stanowiącego odpad po przeprowadzonych badaniach.

Kolejny istotny element pracy to rzetelność przygotowania badań. Zarówno próbki jak i ściernice poddano kontroli celem zachowania porównywalnych warunków przebiegu kolejnych doświadczeń. Dokonano pomiarów makro i mikrogeometrii ściernic, sprawdzając je pod względem podobieństwa i powtarzalności geometrii. W ramach pomiarów makrogeometrii wykonano pomiary średnicy zewnętrznej, kąta stożka oraz bicia osiowego. Należało również pomierzyć średnicę otworu, gdyż na niej jest ustalenie ściernicy na oprawce a dalej we wrzecionie obrabiarki. Uzyskane duże wartości bicia osiowego ściernicy być może wynikały z luźnego pasowania pomiędzy otworem ściernicy a trzpieniem oprawki. Realizacja pomiaru na powierzchni stożkowej sprawia, że mierzone odchyłki pochodzą zarówno od bicia osiowego jak i promieniowego. Odpowiedzią na to, mógłby być pomiar bicia promieniowego ściernicy wykonany na zmierzonej średnicy zewnętrznej. Prawidłowym podejściem do badań mikrogeometrii ściernic był wybór urządzenia pomiarowego, oparty na porównaniu zmierzonej ich topografii, celem jak najlepszego odtworzenia geometrii powierzchni roboczej. Oryginalnym osiągnięciem pracy jest przygotowanie sposobu pomiaru czynnej powierzchni ściernicy oraz wyselekcjonowanie parametrów najlepiej charakteryzujących jej zużycie. Selekcję wykonano z użyciem metod statystycznych pozwalających na wyciąganie wniosków w oparciu o metody statycznej weryfikacji hipotez. Jest to prawidłowe podejście w

odniesieniu do ściernicy, której powierzchnia robocza ma losowy rozkład geometrii. Z uwagi na plan dalszych badań nakreślony w pracy, przewidujący porównanie uzyskanych wyników z wynikami badań innych ściernic, jak również ewentualne badania innych ośrodków naukowych odnoszące się do prezentowanych wyników, mając tak dokładnie pomierzoną geometrię czynnej powierzchni ściernicy, należało uzupełnić braki w podanej przez producenta charakterystyce. Chodzi tutaj o koncentrację ziarna lub ich liczbę przypadającą na jednostkę powierzchni co jest wystarczające w odniesieniu do ściernicy jednowarstwowej. Istotną informacją jest również materiał korpusu ściernicy.

Badania zasadnicze zostały poprzedzone badaniami wstępnymi co pozwoliło na wprowadzenie ewentualnych korekt w poczynionych ustaleniach. Badania zasadnicze wykonano prawidłowo wykorzystując rotabilny plan badań. Szkoda, że w ramach badań zasadniczych nie przeprowadzono całościowych badań zużycia wszystkich ściernic, do końca okresu ich trwałości, tylko założono zakończenie po usunięciu założonej objętości materiału. Byłoby to wskazówką, w badanym przypadku, na temat ustawień parametrów wejściowych procesu, w celach maksymalnego wykorzystania potencjału obróbkowego ściernicy. W ramach badań zasadniczych na uwagę zasługuje fakt wnikliwej analizy przedwczesnego zużycia niektórych ściernic.

Uzyskane wyniki badań zasadniczych nie rewolucjonizują wiedzy na temat procesu szlifowania i towarzyszących im zjawisk oraz form zużycia ściernic. Jak Doktorantka stwierdziła, zgodne są z oczekiwaniami i wynikami prezentowanymi w literaturze. W ramach pracy, posłużyły one do analiz i wniosków dotyczących przebiegu zużycia ściernic. Posłużyły również, do opracowania modeli matematycznych procesu, w których wykorzystano wskaźniki średniego tempa zużycia ściernicy. Poprawność wyboru wskaźników została zweryfikowana poprzez obliczenia korelacyjne z innymi parametrami, co jest właściwym posunięciem potwierdzającym poprawność poczynionych założeń. Opracowanie modeli oraz ich ocenę również oparto o wykorzystanie szeregu narzędzi statystycznych. Służyły one przede wszystkim, sprawdzeniu poprawności wyników badań wykorzystywanych w budowie modelu, sprawdzeniu istotności uzyskanych współczynników w równaniach matematycznych, czy wreszcie sprawdzeniu dopasowania modelu do wyników eksperymentu poprzez obliczenia korelacji. W tym punkcie można zauważyć samokrytyczne podejście Doktorantki do uzyskanych efektów, polegające na wielu próbach przygotowania modeli roboczych celem zapewnienia adekwatności modeli finalnych. Opracowane modele i wykonane na ich podstawie charakterystyki, pozwalają w analizowanym przypadku na ilościowe określenie wpływu parametrów technologicznych oraz ich interakcji, na przebieg procesu szlifowania i zużycia ściernicy. Może to mieć znaczenie w prognozowaniu i monitorowaniu pracy narzędzia. Przygotowane modele i opracowane charakterystyki to również niewątpliwe osiągnięcie pracy.

Podsumowując należy stwierdzić, że zaprezentowany sposób postępowania podczas badań jest właściwy. Badania zostały przygotowane i przeprowadzone

poprawnie a uzyskane wyniki wnikliwie przeanalizowane. Zarówno wyszczególnienie problemów, jak i sposób podejścia do ich rozwiązania, świadczą o umiejętności właściwego spojrzenia na przedmiot badań. Uważam, że szeroki zakres badań jaki przedstawiono w pracy i uzyskane wyniki, mogą być podstawą do znacznie szerszego wachlarza dalszych prac od wyszczególnionych w zakończeniu pracy.

### **2.3. Strona redakcyjna i edytorska pracy**

Bazując na przedstawionej charakterystyce pracy można stwierdzić, że występują w niej typowe elementy prac naukowych. Zawiera wprowadzenie w istotę problemu, pokazanie aktualnego stanu badań z danego obszaru, określenie celu i tezy pracy oraz propozycję rozwiązania podejmowanych problemów poparte szeregiem badań. Prezentowane zagadnienia są logicznie podzielone, kompleksowo tematycznie przedstawione, dopasowane do kolejnych etapów prac. Przyjęty układ pracy jest więc właściwy.

Praca bazuje na 281 pozycjach literatury. Są to pozycje w zdecydowanej większości współczesne jak i pozycje publikowane w latach wcześniejszych. Wszystkie pozycje literaturowe mają powołania tekście.

Czytając pracę można spotkać literówki oraz nieliczne niedomówienia, wynikające z niedopatrzenia czy błędnego doboru wyrazów. Te drobne usterki najczęściej samoistnie się wyjaśniają w dalszej treści pracy. W niektórych miejscach występują krótkie powtórzenia podanych wcześniej informacji. Najprawdopodobniej wynikają z celowego zamierzenia Doktorantki służącego kompleksowemu przedstawieniu treści w danym rozdziale.

Oceniając tę stronę pracy należy stwierdzić, że robi bardzo pozytywne wrażenie. Składa się na to staranność wykonania, logiczny tematyczny podział na rozdziały, zrozumiały język oraz przejrzystość i czytelność elementów graficznych pracy. Przedstawione usterki w niczym nie umniejszają pozytywnej oceny.

### **3. Uwagi i pytania do pracy**

Pomimo dużej staranności i solidności wykonania pracy, szerokiego i dokładnego omówienia wielu zagadnień nasuwają się uwagi i pytania na które chcę zwrócić uwagę:

- Ziarno B35 wg producentów dedykowane jest do gładzenia, docierania, polerowania. Czym kierowano się w wyborze wielkości ziarna badanych ściernic?
- W opracowanej procedurze, dotyczącej pomiaru topografii czynnej powierzchni ściernicy, na podstawie krzywej udziału materiałowego, określany jest poziom odcięcia do określania wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni. W pracy nie podano koncentracji ziarna ściernic a w obróbce dokładnej zalecana

jest duża wartość. Czy wzrost koncentracji ziarna nie utrudni określania poziomu odcięcia?

- Oszczędnościowe działania sprawiły, że badania wielu ściernic przerwano przed ich całkowitym zużyciem. Gdyby badań nie przerwano, to czy, na podstawie analizowanych wskaźników struktury geometrycznej powierzchni, możliwe jest określenie geometrycznych, granicznych kryteriów, po przekroczeniu których ściernica nie nadaje się do użycia?
- W ustalaniu zakresu zmian parametrów technologicznych prędkość szlifowania i posuwu wynikały z możliwości obrabiarki. Czym kierowano się w doborze głębokości szlifowania?
- Aktualnie po przeprowadzeniu badań, pomijając ograniczenia obrabiarki, jaki zakres parametrów technologicznych zostałyby przyjęty?
- Z technologicznego punktu widzenia w opracowanych modelach regresyjnych, określenie dotychczasowej objętości usuniętego materiału może być trudne. Czy liniowa aproksymacja zmian wskaźników średniego tempa zużycia ściernicy  $dZ/dV$  i  $dZ/dt$  w funkcji usuniętego materiału, z ewentualnym odrzuceniem wyników odpowiadających początkowemu i końcowemu przyśpieszonemu zużyciu ściernicy i w efekcie wykorzystanie kąta nachylenia prostej, nie uprościłoby modeli regresyjnych do trzech zmiennych niezależnych?
- Na ile uzyskane wyniki badań można odnieść na inne ściernice w tym pochodzące od innych producentów?

#### 4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując, można stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Anny Bazan podejmuje ważny temat, zarówno z poznawczego jak i praktycznego punktu widzenia. Biorąc pod uwagę staranność przygotowania pracy, prezentację wyników, różnorodność i pracowitość opracowanych modeli i przeprowadzonych analiz, przygotowanie stanowiska badawczego oraz opracowanie metodyki ilościowej oceny zużycia ściernicy, praca wykonana jest w stopniu bardzo dobrym. Dodatkowo, umiejętności praktyczne w zakresie odpowiedniego wykorzystania systemów pomiarowych, narzędzi analizy danych i zasad prowadzenia eksperymentów, świadczą o zdolności i predyspozycjach Doktorantki do prowadzenia prac naukowych.

Przedstawione w recenzji uwagi mogą stanowić zbiór wskazówek w dalszej pracy naukowej.

**Stwierdzam, że rozprawa spełnia wymogi o stopniach i tytule naukowym. Wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

*Skoczyles*