

dr hab. inż. Rafał Świercz, prof. uczelni  
Politechnika Warszawska  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

Warszawa, dn. 28.02.2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej  
pt.:

„Wpływ charakterystyki ściernic diamentowych na proces jednoprzęściowego szlifowania rowków wiórowych frezów z ultradrobnoziarnistych węglików spiekanych ”

Autor: mgr inż. Marcin Sałata

Promotor: prof. dr hab. inż. Jan Burek  
Promotor pomocniczy: dr inż. Łukasz Żyłka

Opracowano na zlecenie  
Przewodniczącego Rady Dyscypliny  
Inżynieria Mechaniczna  
Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza  
Pana dr hab. inż. Andrzeja Burghardta, prof. PRz  
z dnia 18.01.2022 r.

#### 1. Treść i zakres rozprawy

Recenzowana praca dotyczy badania wpływu parametrów i warunków obróbki procesu szlifowania jednoprzęściowego rowków wiórowych narzędzi skrawających z ultradrobnoziarnistego węgla spiekane na wybrane wskaźniki technologiczne i jakościowe badanego procesu. Głównym przedmiotem zainteresowania doktoranta było wyznaczenie wpływu wielkości i koncentracji ziarna ściernego oraz rodzaju spoiwa ściernic diamentowych na składową normalną siłę szlifowania, temperaturę szlifowania, topografię powierzchni rowka wiórowego oraz stan krawędzi skrawającej.

We wprowadzeniu do rozprawy autor w zwięzły sposób przedstawił problematykę poruszanego zagadnienia.

W rozdziale II autor opisał stan zagadnienia dotyczący problematyki szlifowania rowków wiórowych frezów pełnowęglkowych. Szczególna uwaga skoncentrowana została na analizie nowoczesnych metod kształtowania narzędzi skrawających poprzez zastosowanie procesu jednoprzęściowego szlifowania. W dalszej części autor przedstawił charakterystykę ściernic diamentowych, problematykę analizy wpływu parametrów i warunków obróbki na wartość siły szlifowania i temperatury procesu szlifowania. Przybliżono aktualną wiedzę opisującą zjawiska fizyczne występujące w procesie szlifowania w odniesieniu do pracy ziaren ściernych determinujące proces usuwania materiału. Istotną część rozdziału stanowi opis wpływu parametrów i warunków obróbki szlifowania narzędzi skrawających na jakość obrabianej powierzchni. Autor w oparciu o analizę stanu badań zidentyfikował luki w istniejącym stanie wiedzy dotyczącym badanego zagadnienia i na tej podstawie sformułował temat oraz cel i zakres rozprawy.

W rozdziale III przedstawiono cel i zakres pracy. Postawiono tezę „Można określić zależności pomiędzy wielkością ziarna ściernego, koncentracją ziarna oraz rodzajem spoiwa ściernic diamentowych, a siłą normalną szlifowania, temperaturą szlifowania, topografią powierzchni rowka wiórowego i dobrać taką charakterystykę ściernicy, która umożliwi uzyskanie wymaganej jakości rowka wiórowego narzędzia i jednocześnie redukcję temperatury i siły szlifowania, w wysokowydajnym procesie jednoprzęściowego szlifowania rowków wiórowych frezów wykonanych z ultradrobnoziarnistego węgla spiekaneego”.

Rozdział IV zawiera opis warunków badań, metodyki badawczej oraz aparatury stosowanej w badaniach. W kolejnych etapach scharakteryzowano szczegółowo przedmiot badań, materiał obrabiany, ściernice diamentowe oraz plan badań doświadczalnych oparty o metodykę eksperymentu planowanego. W dalszej części autor przedstawił opracowany oryginalny tor pomiarowy, który umożliwił pomiar składowych sił szlifowania oraz pomiar temperatury szlifowania w procesie jednoprzęściowego szlifowania rowków wiórowych frezu. Badania doświadczalne realizowano przy zastosowaniu nowoczesnej, specjalistycznej aparatury, maszyn i urządzeń technologicznych.

W rozdziale V przedstawiono opisy i rezultaty badań doświadczalnych realizowanych w ramach dysertacji oraz ich analizę. Badania obejmowały ocenę wpływu parametrów technologicznych procesu szlifowania jednoprzęściowego tj. prędkość posuwu  $v_f$  i prędkości

szlifowania  $v_s$  na temperaturę szlifowania  $T$ , składową normalną siłę szlifowania  $F_n$  oraz parametry chropowatości powierzchni. Szczególna uwaga skoncentrowana została na wyznaczeniu wpływu przyjętych zmiennych niezależnych dla trzech rodzajów ściernic diamentowych o różnej charakterystyce: trzech wartości koncentracji ziarna  $C$ : C75, C100, C125, trzech wartości wielkości ziarna  $D$ : D46, D64, D91 oraz trzech spoiw: spoiwo żywiczne, spoiwo hybrydowe 1 oraz spoiwo hybrydowe 2 na:

- temperaturę szlifowania,
- składową normalną siłę szlifowania  $F_n$ ,
- chropowatość powierzchni  $R_a$  i  $R_z$ .

Istotną częścią pracy jest opracowanie modeli matematycznych opisujących wpływ przyjętych zmiennych niezależnych na wskaźniki technologiczne procesu jednoprzęściowego szlifowania rowków wiórowych narzędzi skrawających z ultradrobnoziarnistego węgla spiekanego. Na podstawie wyników z przeprowadzonych badań doświadczalnych obejmujących 108 prób technologicznych, wyznaczono równania regresji opisujące wpływ prędkość posuwu  $v_f$  i prędkości szlifowania  $v_s$  na temperaturę szlifowania, składową normalną siłę szlifowania  $F_n$ , chropowatość powierzchni  $R_a$  i  $R_z$ , dla trzech rodzajów ściernic diamentowych o różnej charakterystyce. Przeprowadzona analiza statystyczna wyznaczonych równań regresji wykazała, iż opracowane modele procesu są adekwatne i charakteryzują się wysokim stopniem dopasowania do danych empirycznych.

W rozdziale VI przedstawiono drugi etap prac badawczych obejmujący analizę zużycia ściernic diamentowych dla trzech rodzajów spoiw ściernic diamentowych. Genezą prowadzonych badań w tym obszarze była ocena wpływu zużycia promienia naroża ściernicy  $\Delta r_s$  oraz zużycia średnicowego ściernicy  $\Delta D_s$  na analizowane wskaźniki technologiczne procesu. Uzyskane wyniki badań doświadczalnych wskazują na pomijalnie mały wpływ zużycia ściernic na pole przekroju rowka wiórowego, potwierdzając tym samym poprawność przyjętej metodyki badań doświadczalnych i opracowanych modeli regresyjnych procesu.

W rozdziale VII przedstawiono kolejny etap prac badawczych. Autor skoncentrował swoją uwagę na opracowaniu modeli matematycznych opisujących wpływ badanych zmiennych niezależnych tj. prędkość posuwu  $v_f$  prędkości szlifowania  $v_s$ , koncentracji ziarna  $C$ , oraz wartości wielkości ziarna  $D$ , dla trzech rodzajów spoiw na wybrane wskaźniki technologiczne procesu. Przeprowadzona analiza statystyczna opracowanych modeli potwierdza ich adekwatność i wysoki stopień dopasowania równań regresji do wyników

badania doświadczalnych. W oparciu o uzyskane wartości statystyki F dla rozkładu funkcji Fishera-Snedecora określono istotność poszczególnych zmiennych niezależnych uwzględnionych w opracowanych modelach regresyjnych. Autor dokonał również analizy zależności pomiędzy charakterystyką ściernic i parametrami technologicznymi, które pozwoliły mu na ocenę wpływu ich interakcji na badane wskaźniki technologiczne. Z uwagi na uzyskanie niskich wartości dopasowania modelu regresji dla wyników badań doświadczalnych dla modelu opisującego wpływ badanych zmiennych niezależnych na promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej  $r_n$ . Autor dokonał analizy wyników badań doświadczalnych w oparciu o wykresy pudełkowe. Wyznaczone wartości mediany, rozstępu ćwiartkowego oraz rozstępu wyników badań pozwoliły na ocenę wpływu wielkości ziarna oraz koncentracji dla trzech badanych spoiw ściernicy diamentowej na promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej  $r_n$ .

W ostatnim podrozdziale autor dokonał analizy porównawczej uzyskanych wyników badań doświadczalnych w odniesieniu do zastosowanego spoiwa. Dokonano oceny wpływu wydajności procesu na temperaturę szlifowania, składową normalną siłę szlifowania  $F_n$ , chropowatość powierzchni  $R_a$  i  $R_z$  oraz promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej  $r_n$ .

W rozdziale VIII przedstawiono podsumowanie i wnioski o charakterze poznawczym i użytkowym oraz zdefiniowano kierunki dalszych badań.

Bibliografia obejmuje 183 pozycje literaturowych, w tym jednaście współautorskich artykułów naukowych Doktoranta. Cytowane źródła literaturowe są adekwatne do tematyki rozprawy i obejmują aktualne artykuły z czasopism naukowych, materiałów konferencyjnych i opracowań książkowych.

## 2. Ocena ważności podjętego problemu naukowego

W ostatnich latach obserwowane są istotne zmiany technologiczne ukierunkowane na wytwarzanie narzędzi skrawających, które pozwolą na wzrost wydajności procesu skrawania przy jednoczesnym uzyskaniu wysokich dokładności wymiarowo kształtowych wytwarzanych części i jakości obrabianych powierzchni. Spełnienie powyższych wymagań wiąże się z wprowadzaniem nowych materiałów na narzędzia skrawające, które pozwolą na efektywne usuwanie materiału przy podwyższonych parametrach skrawania. Jednym z nowoczesnych materiałów wykorzystywanych na narzędzia skrawające jest

ultradrobnoziarnisty węgiel spiekany, którego własności takie jak wysoka twardość oraz wytrzymałość na zginanie pozwalają na zastosowanie podwyższonych parametrów obróbki. Niska skrawalność węglików spiekanych determinuje zastosowanie w procesie kształtowania geometrii narzędzi skrawających obróbki szlifowaniem z wykorzystaniem ściernic diamentowych. Jednym z ważnych obszarów badawczych w tym zakresie jest wyznaczenie wpływu parametrów i warunków procesu szlifowania na wskaźniki technologiczne tj. wynikowa jakość obrabianej powierzchni, geometrię narzędzia skrawającego oraz wartość siły szlifowania i temperatury szlifowania. Stosunkowo niewielka liczba prac badawczych dotyczy procesu szlifowania narzędzi monolitycznych tj. wiertła i frezy. Poszczególne etapy wytwarzania monolitycznych narzędzi skrawających obejmują obróbkę czołową, obwodową oraz rowków wiórowych. Z punktu widzenia efektywności procesu wytwarzania szczególnie istotne jest zagadnienie kształtowania rowków wiórowych które zajmuje 60-80 % czasu całkowitej obróbki frezu. Poszukiwane są zatem nowe rozwiązania technologiczne w procesie szlifowania, które umożliwią z jednej strony skrócenie czasu obróbki przy jednoczesnym uzyskaniu wymaganej dokładności geometrycznej i jakości obrabianych powierzchni. Jednym z nowych obszarów badawczych jest zastosowanie jednoprzęściowego szlifowania, które umożliwia usunięcie całego naddatku obróbkowego w jednym przejściu ściernicy. Proces szlifowania rowków wiórowych wpływa na kształt przekroju poprzecznego narzędzia, geometrię i jakość głównej krawędzi skrawającej, powierzchnię natarcia oraz topografię powierzchni rowka.

Zastosowanie procesu jednoprzęściowego szlifowania rowków wiórowych narzędzi skrawających z ultradrobnoziarnistego węgla spiekane w odniesieniu do ściernic o różnych charakterystykach: wielkość i koncentracji ziarna ściernego oraz rodzaju spoiwa ściernic diamentowych w istotny sposób wpływa na zmianę przebiegu procesu usuwania materiału i kształtowania geometrii narzędzia oraz cech topografii obrabianych powierzchni w stosunku do dotychczas opisanych w literaturze. Stosunkowo niewielka liczba publikowanych prac badawczych odnosi się do analizy wpływu parametrów obróbki i charakterystyki ściernic na siły występujące w procesie szlifowania, temperaturę szlifowania oraz cechy topografii powierzchni podczas obróbki monolitycznych narzędzi skrawających z węglików spiekanych. Odpowiedni dobór parametrów i warunków obróbki procesu jednoprzęściowego szlifowania rowków wiórowych narzędzi z ultradrobnoziarnistych węglików spiekanych wymaga zatem przeprowadzenia kompleksowych badań, które

umożliwią opracowania nowych podstaw technologicznych obróbki. Dlatego wybór tematyki rozprawy, uważam za słuszny zarówno ze względów poznawczych jak i utylitarnych.

### 3. Ocena merytoryczna

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Marcina Sałaty stwierdzam, że analiza stanu zagadnienia, opracowanie oryginalnego stanowiska do badań doświadczalnych procesu jednoprzęściowego szlifowania rowków wiórowych frezów, dobór aparatury naukowo-badawczej, przedstawiony plan i metodyka badań doświadczalnych wskazuje, że praca została zrealizowana wzorowo pod względem metodycznym. Przeprowadzone badania zgodne z teorią eksperymentu planowanego oraz opracowanie wyników badań, prezentują wysoki poziom merytoryczny.

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Marcina Sałaty charakteryzuje się wieloma aspektami nowości i oryginalności. Zagadnienie obróbki jednoprzęściowego szlifowania rowków wiórowych frezów z ultradrobnoziarnistych węglików spiekanych jest tematem aktualnym i trudnym do opisu ze względu na złożone warunki kontaktu pomiędzy przedmiotem obrabianym a ściernicą. Należy wyrazić uznanie dla Doktoranta, za podjęcie tego trudnego i bardzo ważnego tematu w świetle potencjalnego zastosowania w przemyśle.

Za największe, oryginalne osiągnięcia naukowe Doktoranta uważam, wyznaczenie i opisanie wpływu głównych technologicznych parametrów obróbki i różnych charakterystyk ściernic diamentowych na składową normalną siłę szlifowania, temperaturę szlifowania, stan krawędzi skrawającej oraz chropowatość powierzchni rowka wiórowego. Wyznaczone równania regresji stanowią podstawę projektowania procesów technologicznych ukierunkowanych na osiągnięcie określonych rezultatów obróbki procesu jednoprzęściowego szlifowania rowków wiórowych frezów z ultradrobnoziarnistego węgla spiekane. Na uwagę zasługuje szeroki zakres wykonanych badań doświadczalnych (wykonano 324 próby szlifowania rowka wiórowego) które umożliwił autorowi pogłębioną ocenę uzyskanych wyników.

Istotne z punktu widzenia rozszerzenia dotychczasowej wiedzy jest opisanie zależności pomiędzy wielkością ziarna ściernego, koncentracją ziaren oraz rodzajem spoiwa ściernic diamentowych na wskaźniki technologiczne procesu.

Opiniowana rozprawa realizowana była w oparciu o zróżnicowane nowoczesne techniki badawcze, aparaturę i urządzenia technologiczne oraz stanowi istotne osiągnięcie

Doktoranta w obszarze badań nad wydajną obróbką wykończającą rowków wiórowych frezów. Przeprowadzone oryginalne badania doświadczalne miały charakter interdyscyplinarny i dają naukowe podstawy do rozwoju technologii jednoprzęściowego szlifowania ultradrobnoziarnistych węglików spiekanych. Na podkreślenie zasługuje nowatorski charakter badań i możliwość wdrożenia ich wyników w warunkach przemysłowych co potwierdza złożenie dwóch wniosków o ochronę patentową na wynalazek związany bezpośrednio z tematyką rozprawy.

Prezentowane w rozprawie badania doświadczalne realizowane były w ramach uzyskanego grantu na prace B+R jednostek naukowych pt. „Podkarpackie Centrum Innowacji” Regionalny Program Operacyjny Województwa Podkarpackiego na lata 2014-2020, Tytuł projektu: „Nowatorska technologia wytwarzania narzędzi skrawających dedykowanych dla przemysłu lotniczego”.

#### 4. Uwagi do pracy

Generalnie, praca napisana jest na bardzo dobrym poziomie z zastosowaniem właściwej terminologii. Nie mniej jednak Autor nie uniknął błędów językowych, edytorskich i stylistycznych np.:

- str. 50, „Do badań przyjęto centralny plan kompozycyjny ortogonalny (FCD) dla dwóch zmiennych zależnych przyjmujących po trzy poziomy wartości.....” – edycja, powinno być: „niezależnych”;
- uzyskana wartość statystyki F, prezentowana w tabelach 7.4, 7.8, 7.12 w stosunku do wartości podanej w analizie zawartej w tekście powinna być zaokrąglana zgodnie z obowiązującymi zasadami matematycznymi np. wartość statystyki F dla prędkości posuwu prezentowana w tabeli 7.4 wynosi  $F = 363,9$  natomiast w opisie tekstowym pod tabelą wartość statystyki  $F=369$ ;
- błędna numeracja rysunków w tekście: str.110, rys. 5.21 (powinno być 5.24); str. 126, rys. 5.27 (powinno być 5.36); str. 131, rys. 5.27 (powinno być 5.36); str. 146, rys. 7.1 (powinno być 7.6); str. 168, rys. 7.22 (powinno być 7.25); str. 172, rys. 7.22 (powinno być 7.28); str. 177-178, rys. 7.35 (powinno być 7.32);
- niska czytelność rysunków: 7.20, 7.30, 7.31;

- str. 176, „.....co wynika z podobnego kształtu krzywych przedawnionych na rys. 7.30c.” – edycja

Pewien niedosyt budzi fakt braku pogłębionej analizy pracy ziaren ściernych i próby modelowania MES badanego procesu, która mogłaby ograniczyć liczbę przeprowadzonych badań doświadczalnych.

W niektórych przypadkach Autor we wnioskach ogranicza się do opisu zależności podając, że analizowana wielkość rośnie lub maleje w funkcji zmiennych niezależnych nie podejmując próby interpretacji fizycznej tych zależności i objaśnienia ich w oparciu o pracę ziarna ściernego.

Poniżej wymieniono uwagi o charakterze dyskusyjnym z prośbą do Autora rozprawy o ustosunkowanie się:

1. W rozdziale 4 przedstawiono plan badań doświadczalnych realizowanych w oparciu o metodykę eksperymentu planowanego. Opisano plan trypoziomowy dwuczynnikowy – dla dwóch zmiennych niezależnych: prędkości skrawania oraz prędkości posuwu. Proszę scharakteryzować jaki plan eksperymentu przyjęto dla badań opisanych w rozdział 7 – dla czterech zmiennych niezależnych.
2. W większości opracowanych modeli uzyskano wysoki stopień dopasowania równań regresji do wyników badań doświadczalnych, natomiast dla modeli opisujących wpływ wielkości ziarna na oraz koncentracji ziarna na promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej  $r_n$  wartości statystyk testowych wskazały na statystycznie niską zależność pomiędzy parametrami wejściowymi a analizowanymi parametrami wyjściowymi. Podobnie dla niektórych z modeli opisujących wpływ prędkości skrawania i posuwu na chropowatość  $R_a$  i  $R_z$  nie wyznaczono statystycznie istotnych zależności. Proszę o pogłębioną dyskusję nad uzyskanymi rezultatami w odniesieniu do wpływu zastosowanych parametrów i warunków obróbki jednoprzęściowego szlifowania. Jakie czynniki miały wpływ, iż w tym przypadku nie uzyskano statystycznie istotnych równań regresji.
3. W rozdziale 7.5 wprowadzono nową zmienną zależną  $Q_w$ , która zgodnie z opisem nie odnosi się bezpośrednio do objętości usuwanego materiału w jednostce czasu a wyraża prędkość posuwu. Jaki był cel wprowadzania tak zdefiniowanej nowej zmiennej zależnej.



Niezależnie od wymienionych uprzednio uwag krytycznych nie umniejszają one pozytywnej oceny merytorycznej opiniowanej rozprawy doktorskiej.

#### 5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Uważam, że recenzowana rozprawa prezentuje wysoki poziom merytoryczny i zawiera wiele elementów nowości i oryginalności. Przedstawione rezultaty mają zarówno istotne znaczenie naukowe jak i użyteczne i stanowią ważny wkład w rozwój technologii jednoprzęściowego szlifowania narzędzi z ultra drobnoziarnistych węglików spiekanych ściernicami diamentowymi. Ponadto stwierdzam, że Autor wykazał się szeroką interdyscyplinarną wiedzą, umiejętnością planowania i realizacji badań naukowych oraz umiejętnością oceny uzyskanych wyników.

Poziom naukowy przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz interpretacja wyników badań jest bardzo wysoka. Przeprowadzone badania obejmują zarówno analizę wpływu parametrów technologicznych procesu jednoprzęściowego szlifowania jak i charakterystyki zastosowanych ściernic diamentowych, co w istotny sposób wpływa na przebieg procesu usuwania materiału i kształtowania geometrii narzędzi w stosunku do dotychczas opisanych w literaturze. Przedstawiony w rozprawie szeroki zakres przeprowadzonych prac badawczych wraz z interpretacją wyników badań stanowi istotny i oryginalny wkład w poznanie i rozwój technologii jednoprzęściowego szlifowania węglików. Dlatego uważam, że recenzowana rozprawa zasługuje na **wyróżnienie**.

Uwzględniając powyższe stwierdzam, że rozprawa doktorska opracowana przez Pana mgr. inż. Marcina Sałatę pt. „Wpływ charakterystyki ściernic diamentowych na proces jednoprzęściowego szlifowania rowków wiórowych frezów z ultradrobnoziarnistych węglików spiekanych” spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa i może być dopuszczona do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

*Berecz*