

Kraków, 31.12.2020

Dr hab. inż. Jacek Cieřlik  
Profesor uczelni  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie  
Al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Sułkowicza  
pt. „Stabilizacja gęębokości szlifowania wałków o małej sztywności w procesie jednoprzęściowego  
szlifowania wzdłużnego”

### 1. Wstęp

Niniejsza recenzja została przygotowana na podstawie pisma zlecającego opracowanie recenzji skierowanego do mnie przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza prof. Aleksandra Mazurkova, prof. PRz z dnia 28 września oraz umowy o dzieło nr NN/98/2020 podpisanej przez Prorektora ds. Nauki Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza, dr hab. inż. Lesława Gniewka, prof. PRz, z dnia 6 października 2020 roku.

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Sułkowicza pt. „Stabilizacja gęębokości szlifowania wałków o małej sztywności w procesie jednoprzęściowego szlifowania wzdłużnego”, która została przygotowana pod kierunkiem promotora Prof. dr. hab. inż. Jana Burka, oraz promotora pomocniczego dr inż. Roberta Babiara z Katedry Technik Wytwarzania i Automatyzacji Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza.

Ocena rozprawy została opracowana zgodnie z wymogami ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytułach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule z zakresu sztuki (Dz.U. nr 65 poz. 595) z późniejszymi zmianami oraz zgodnie z ogólnymi zasadami oceny prac doktorskich przez recenzentów.

### 2. Ocena rozprawy doktorskiej

#### 2.1. Ocena ogólna

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska liczy 130 stron i składa się z sześciu rozdziałów, spisu literatury obejmującej 157 pozycji, wykazu ważniejszych symboli i akronimów oraz załącznika zawierającego listing (wydruk) programu komputerowego. Zawiera bogaty materiał ilustracyjny w postaci 71 rysunków i schematów oraz 13 tabel. Praca jest napisana starannie pod względem stylistycznym, w całości w języku polskim i zawiera streszczenie w języku angielskim.

W rozdziale 1-szym po krótkim wprowadzeniu oraz uzasadnieniu wyboru tematu pracy przedstawiono i skomentowano strukturę pracy. W pierwszej części drugiego rozdziału Autor przedstawił przegląd głównych problemów naukowych i stanu wiedzy w zakresie szlifowania wałków o małej sztywności, w tym krytyczny szeroki przegląd literatury z obszaru obejmującego temat rozprawy. Szczególnie starannie przeanalizował charakterystykę procesu szlifowania wałków – szlifowanie bezkłowe i wzdłużne kłowe. W kolejnym podrozdziale przeanalizował metody szlifowania jednoprzęściowego w odniesieniu do wałków o małej sztywności, również wsparte wnikliwym przeglądem literatury.

Oddzielne podrozdziały rozdziału 2-go poświęcił analizie sił szlifowania występujących podczas szlifowania wzdłużnego, zjawisku zużycia ściernicy, metodom oceny odchyłek kształtu i wymiarów szlifowanych wałków oraz sposobie wyznaczania odkształceń sprężystych w układzie OPN. Dla tego ostatniego tematu przytoczył model dynamiczny układu OPN szlifierki, którego jednak nie analizował dalej w pracy. Jeden z podrozdziałów rozdziału 2-go przedstawia bardzo skrótowo zjawisko emisji akustycznej i omawia potencjalne jego zastosowanie do oceny sił szlifowania. W ostatnim podrozdziale omówił możliwe i stosowane metody sterowania procesem szlifowania wzdłużnego, z wnioskami opracowanymi na podstawie przeglądu literatury.

Autor w swojej pracy skupił się metodach mających na celu ograniczenie dwóch błędów kształtu wałka - barytkowości i stożkowości. Przeanalizował zalety, wady i ograniczenia dotychczas stosowanych metod. Nie odniósł się natomiast do innych błędów kształtu takich jak odchyłka okrągłości i wygięcie. Odchyłka okrągłości jest często skutkiem cyklicznych drgań w układzie OPN.

Metoda zapobiegania powstawaniu odchyłek barytkowości i stożkowości polegająca na stosowaniu podtrzymek jest trudna do zastosowania zarówno w przypadku podtrzymek stałych jak i podtrzymek ruchomych. Podtrzymki stałe (nieruchome) do poprawnego ustawienia wymagają wiedzy i doświadczenia operatora szlifierki, a ponadto mogą powodować uszkodzenia obrabianej powierzchni. Nie zapobiegają w pełni powstawaniu odkształceń sprężystych obrabianego przedmiotu, zwłaszcza w miejscach oddalonych od kłów szlifierki i samego miejsca ustawienia podtrzymki.

Do zastosowania podtrzymek ruchomych, przemieszczających się wzdłuż obrabianego przedmiotu, konieczna jest modyfikacja układu kinematycznego szlifierki, co zwykle jest kosztowne, a dla niektórych typów szlifierek może być niemożliwe do zastosowania.

Tradycyjne najczęściej stosowane metody zapobiegania odchyłkom barytkowości i stożkowości polegają na zmniejszeniu sił szlifowania poprzez zmianę parametrów technologicznych. Jest to rozwiązanie nieekonomiczne, ponieważ znacząco wydłuża czas obróbki. Jednoprzeciściowe procesy szlifowania są badane jako możliwe do zastosowania metody w opracowaniu nowych technologii szlifowania wysokowydajnego.

W pracy autor przedstawił propozycje oryginalnej metody szlifowania jednoprzeciściowego, umożliwiającą znaczne ograniczenie błędów kształtu wałka o małej sztywności.

Trzeci rozdział zawiera sformułowanie celu, tezy i zakresu pracy oraz schemat i omówienie poszczególnych etapów własnych badań doświadczalnych zrealizowanych w pracy. Stanowi to pewne odstępstwo od tradycyjnego układu pracy doktorskiej, w którym cel i teza pracy są formułowane na jej początku. Przyjęty układ pracy w żaden sposób nie umniejsza jej wartości merytorycznej, a nawet pozwala na lepsze zrozumienie układu i uzasadnienia celu pracy poprzedzonego szczegółową analizą stanu wiedzy i technologii zawartym w rozdziale 2-gim. Autor stwierdził, że celem rozprawy jest opracowanie strategii sterowania ruchem dosuwu ściernicy do przedmiotu umożliwiającej stabilizację głębokości szlifowania niezależnie od zmiany odkształcenia sprężystego w układzie OPN.

Uzasadnienie podjęcia tematyki rozprawy Autor przedstawił w końcowej części rozdziału 2-go (str. 46) i umotywiował tym, że dotychczas stosowane metody zwiększenia dokładności szlifowania wałków o małej sztywności polegają głównie na zmniejszeniu odkształcenia sprężystego układu w wyniku stosowania stałych lub ruchomych podtrzymek albo obniżania parametrów technologicznych. Pośrednio można domniemywać, że celem pracy jest poszukiwanie alternatywnej metody szlifowania pozwalającej kontrolować odkształcenie sprężyste wałków w trakcie obróbki, w tym szczególnie szlifowania jednoprzeciściowego.

Cel pracy Autor osiągnął w kolejnych krokach poprzez:

- opracowanie metody sterowania ruchem dosuwu ściernicy,
- przygotowanie programu generującego kod NC dla obrabiarki CNC według własnego algorytmu.
- opracowanie metodyki badawczej oraz przygotowanie projektu i zbudowanie stanowiska badawczego do przeprowadzenia prób procesu szlifowania,

- opracowanie metody i dobór elementów składowych układów pomiarowych do rejestracji, przetwarzania i analizy mierzonych sygnałów,
- szczegółową wieloparametrową analizę uzyskanych wyników i na jej podstawie opracowanie wniosków uzasadniających cel i tezę pracy.

Rozdziały 4 i 5 reprezentują oryginalną część rozprawy doktorskiej. W rozdziale czwartym Autor przedstawił założenia teoretyczne dla metody szlifowania z korekcją toru ruchu ściernicy. Rozdział 5 przedstawia część badawczą rozprawy - opis obiektu badań, opis stanowiska badawczego, następnie kolejno opisy i charakterystyki układów pomiarowych do wyznaczania poszczególnych wielkości fizycznych oraz parametrów obróbki, oceny odkształceń wałka i zużycia ściernicy. Podano szczegółową charakterystykę obrabianych przedmiotów oraz charakterystykę narzędzia ściernego. W podrozdziale 5.4 przedstawiono wyniki badań doświadczalnych, ich analizę oraz krytyczną bardzo wnikliwą ocenę tych wyników.

Chociaż zamierzenia i zastosowane przez Autora metody pomiarowe w zakresie realizacji celu naukowego są dość precyzyjnie określone, to wątpliwości mogą budzić zastosowane metody analizy wyników. Zbudowane przez Autora układy pomiarowe umożliwiały ciągły pomiar i rejestracji przebiegów czasowych sygnałów. Pomimo to do oceny wykorzystywano tylko pomiary w określonych punktach na badanych obiektach, np. na końcach i w środku badanego obiektu. Wyznaczano wartości średnie sygnałów, przy czym tylko w kilku przypadkach sprecyzowano jaką średnią wartość sygnału analizowano – czy była to średnia arytmetyczna amplitudy, czy wartość średnio kwadratowa RMS sygnału. Nie podano zależności matematycznych na podstawie, których wyznaczano wartości średnie dla innych przypadków analizy wyników. Analizę statystyczną wyników pomiarów prowadzono wykorzystując testy t-Studenta, test Shapiro-Wilka, skorygowane współczynniki determinacji i współczynniki korelacji liniowej Pearsona. Do określenia trendu zmian mierzonych parametrów wykorzystywano modele regresji i badano statystyczną istotność tych modeli wykorzystując do tego celu jednoczynnikową analizę wariancji. Pewną niedogodność w odczytywaniu wyników i ich porównywaniu stanowi dwoista forma prezentacji zmian parametrów oceny w postaci wartości bezwzględnych i w postaci wartości zmian wyrażonych w procentach. Brakuje zdefiniowania błędów bezwzględnych wyrażonych w jednostkach siły i jednostkach długości w nawiązaniu do błędów względnych określonych w procentach, które służą do oceny dokładności wyznaczania parametrów procesu. W dalszym procesie publikacji wyników rozprawy doktorskiej zaleca się ujednoczenie formy prezentacji wyników.

W rozdziale 6-tym Autor przedstawił podsumowanie pracy oraz wnioski. Wskazał ponownie na uzasadnienie i motywację do podjęcia określonej tematyki badawczej, na sformułowany wcześniej cel pracy oraz otrzymane oryginalne rezultaty rozprawy. Podał wnioski szczegółowe wynikające z przeprowadzonych badań. Na zakończenie podał jaki jest wkład rozprawy do nauki w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna oraz przedstawił kierunki dalszych badań.

## 2.2. Oryginalne elementy rozprawy

Rozprawa doktorska zawiera rezultaty stanowiące oryginalny wkład Autora w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Za najważniejsze osiągnięcia Autora uważam:

- 1) sformułowanie i opracowanie nowej metody sterowania ruchem dosuwu ściernicy w procesie szlifowania jednorzędowego, która umożliwi zmniejszenie błędów wymiaru i kształtu szlifowanych wałków o małej sztywności w okresie trwałości ściernicy,
- 2) opracowanie strategii sterowania torem ruchu ściernicy na podstawie pomiaru siły normalnej  $F_n$  szlifowania podczas obróbki, co umożliwi wyznaczenie wartości przemieszczenia sprężystego układu OPN w dowolnym miejscu szlifowanego przedmiotu,

3) opracowanie algorytmu do generowania programu sterującego torem ruchu ściernicy, który w zależności od położenia ściernicy w osi Z umożliwia sterowanie dosuwem ściernicy w osi X szlifierki. Zastosowanie danych z programu pozwala na stabilizację wartości rzeczywistej głębokości szlifowania  $a_{er}$  na całej długości szlifowanego przedmiotu i zmniejszenie odchyłki walcowości oraz błędu wymiaru,

4) zbudowanie stanowiska badawczego, na którym przeprowadzono sprawdzenie poprawności działania metody sterowania ruchem dosuwu ściernicy w procesie szlifowania jednoprzęściowego wałków o małej sztywności. Badania wykonano dla różnych wydajności i parametrów szlifowania: przy zmiennych wartościach posuwu na obrót  $f_a$  oraz głębokościach szlifowania  $a_e$ .

5) wykonanie szczegółowej wieloparametrowej analizy wyników badań opracowanej metody sterowania ruchem dosuwu ściernicy w procesie szlifowania jednoprzęściowego i opracowanie wniosków szczegółowych.

### 2.3. Uwagi szczegółowe i ocena poziomu edytorskiego rozprawy

Układ rozprawy jest przejrzysty a treści prezentowane w kolejnych rozdziałach są ze sobą dobrze powiązane, pomimo że największą część rozprawy stanowi przedstawienie i omówienie wyników pomiarów. Autor nie ustrzegł się jednak pewnych błędów i nieścisłości w sformułowaniach oraz w opisie matematycznym:

Str. 37, wzór 2.12 – wzór na zastępczy współczynnik sprężystości zależy sposobu połączenia sprężyn. Podana postać równania jest słuszna dla połączenia szeregowego sprężyn. Na rysunku 2.17 przedstawiony model dynamiczny układu szlifierki zawiera również połączenia równoległe sprężyn oraz tłumienie wiskotyczne. Zatem wzór 2.12 powinien uwzględniać również połączenia równoległe i mieszane sprężyn.

Str. 37, wiersz 9 od dołu i poniżej – „Szacunkowy wpływ poszczególnych elementów układu OPN na wartość przemieszczenia sprężystego przedmiotu ...” wyrażony w procentach bez podania bliższych analiz. Przyjęty złożony model dynamiczny szlifierki pozwala na precyzyjne, a nie tylko szacunkowe określenie wpływu elementów układu OPN na wartość przemieszczenia sprężystego przedmiotu. Określenie tego udziału wymagało by rozwiązania zagadnienia dynamiki układu np. metodami numerycznymi.

Str. 38, wzór 2.13 – podobnie jak w przypadku wzoru 2.12 – podaje wzór na zastępczy współczynnik sprężystości, który zależy sposobu połączenia sprężyn. Podana postać równania jest słuszna dla połączenia szeregowego sprężyn. Nie jest prawdziwa w przypadku połączenia równoległego.

Str. 39, wzór 2.15 – brak źródła lub analizy teoretycznej stanu odkształcenia na podstawie, której sformułowano ten wzór,

Str. 56, wiersz 9 od góry – „Badania przeprowadzono dla różnych wydajności szlifowania ..” – a dalej są podane parametry obróbki bez określenia ich związku z wydajnością obróbki,

Str. 59, wiersz 1 od góry i poniżej – „Rejestrowane w programie sygnały sił mierzonych siłomierzami ... były sumowane” - nie podano metody sumowania sygnałów. Czy było to sumowanie amplitud sygnałów czy wartości skutecznej RMS, czy też przyjęto inny sposób sumowania?

Str. 61, wiersz 6 od dołu – „Zarys powierzchni szlifowanego przedmiotu mierzono 6 razy – co  $60^\circ$ , a następnie wyznaczano wartość średnią”. W jaki sposób wyznaczano wartość średnią z pomiarów?

Str. 64, wiersz 5-6 od góry – uwaga podobna jak dla strony 61.

Str. 67, wiersz 6 od góry i wzór 5.3 – Analizę korelacji przeprowadzono dla danych dyskretnych otrzymywanych z pomiarów. Mierzone sygnały były mierzone jako przebiegi czasowe i w związku z tym była możliwość wykorzystania metod analizy sygnałów czasowych do opracowania wyników np. funkcji korelacji wzajemnej sygnałów. Dlaczego nie podjęto takiej próby opracowania wyników?

Str. 102, wiersz 5 od dołu – niejasne sformułowanie „strefy zbliżonej do stożkowej wskutek tworzenia się stopni” – brak określenia związku pomiędzy tworzącym się stożkiem a stopniami.

Str. 106, Rys. 5.37 – Porównanie sił szlifowania i sygnału emisji akustycznej – nie określono jaka składowa siła szlifowania jest mierzona. Porównano przykładowe przebiegi sygnałów, które ze względu na brak szczegółowego opisu nie wiele wnoszą do analizy. Brak ilościowego związku sygnału siły szlifowania z sygnałem emisji akustycznej, np. określonego na podstawie analizy uzyskanych wyników.

Str. 107, Rys. 5.38 – średnie wartości składowych sił szlifowania – nie określono metody uśredniania sygnału siły,

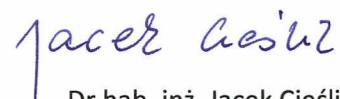
Str. 107, wiersz 1-4 od dołu – Zmiany średniej wartości sygnału emisji akustycznej przyjmują zbliżony charakter do zmian średniej wartości siły  $F_n$  – nie określono charakteru zmian podając jedynie ogólny wskaźnik w postaci współczynnika korelacji.

Mimo wskazanych powyżej błędów i nieściśłości poziom edytorski pracy oceniam jako bardzo dobry. Istotnym elementem podnoszącym wartość edytorską pracy są także starannie wykonane i czytelne rysunki oraz zwięzłe zestawienie i porównanie wyników pomiarów i analiz w tabelach.

### 3. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że praca doktorska mgr. inż. Pawła Sułkowicza pt. „Stabilizacja głębokości szlifowania wałków o małej sztywności w procesie jednoprzęściowego szlifowania wzdłużnego” stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego oraz spełnia, zgodnie z „Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku, z późniejszymi zmianami, wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Praca wykazuje ogólną wiedzę Autora w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna i dowodzi umiejętności prowadzenia zaawansowanych badań naukowych. Pomimo uwag krytycznych rozprawa zasługuje na pozytywną ocenę.

Wobec tego wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Sułkowicza i dopuszczenie jej do publicznej obrony. Jednocześnie z uwagi na wysoki poziom naukowy rozprawy wnioskuję o wyróżnienie pracy doktorskiej.



Dr hab. inż. Jacek Cieślik  
Profesor uczelni