

Łódź, dn. 09. 11. 2020 r.

**dr hab. inż. Marcin Gołąbczak, prof. uczelni
Politechnika Łódzka**

**Recenzja
pracy doktorskiej mgr inż. Pawła Sułkowicza
pt.: „Stabilizacja głębokości szlifowania wałków o małej sztywności w procesie
jednoprześciowego szlifowania wzdłużnego”**

*Recenzja opracowana na zlecenie Prorektora ds. Nauki Politechniki Rzeszowskiej
dr hab. inż. Lesława Gniewka, prof. PRz, z dn. 06.10.2020 r.*

1. Ocena wyboru tematu

Szlifowanie ściernicowe nadal jest podstawowym sposobem dokładnego i wydajnego kształtowania przedmiotów, zwłaszcza wykonywanych z materiałów konstrukcyjnych o dużej twardości i wytrzymałości. Wzrost wymagań stawianych współczesnym procesom wytwarzania, odnośnie uzyskiwania dużej wydajności i jakości obróbki oraz zwiększenia produktywności i elastyczności produkcji, zintensyfikował prace badawcze nad doskonaleniem nowych, innowacyjnych sposobów szlifowania. Zalicza się do nich m.in.: szlifowanie z dużą prędkością ściernicy – HSG (*High Speed Grinding*), szlifowanie z dużą prędkością przedmiotu – SSG (*Speed Stroke Grinding*), szlifowanie wysoko wydajne – HEDG (*High Efficiency Deep Grinding*), szlifowanie z ciągłym sterowaniem toru ściernicy – CPCG (*Continuous Path Controlled Grinding*), szlifowanie ze zredukowanym stykiem ściernicy (*Quickpoint*) oraz hybrydowe odmiany szlifowania wykorzystujące różne formy energii do usuwania nadmiaru obróbkowego.

Recenzowana rozprawa wpisuje się w sposób oczywisty w nurt wymienionych nowych kierunków badań procesów szlifowania, ponieważ dotyczy problematyki zwiększenia efektywności i jakości szlifowania wałków o małej sztywności w procesie jednoprześciowego szlifowania wzdłużnego. Celem rozprawy jest bowiem opracowanie strategii sterowania dosuwem ściernicy do przedmiotu, umożliwiającej stabilizację głębokości szlifowania, niezależnie od odkształceń sprężystych układu OUPN. Dlatego też oceniam

podejmowaną w rozprawie problematykę jako oryginalną i nowoczesną, wychodzącą naprzeciw współczesnym oczekiwaniom i potrzebom przemysłu, a jej temat jako celowy i ważny pod względem poznawczym i aplikacyjnym.

2. Merytoryczna ocena rozprawy

Rozprawa doktorska opracowana jest w postaci monografii zawierającej 171 stron, w tym: 158 rysunków i 34 tabele. Jej zasadniczą treść poprzedzają: podziękowania, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści i wykaz ważniejszych oznaczeń, po którym następuje 10 rozdziałów merytorycznych z wydzielonymi podrozdziałami oraz podsumowanie i wnioski końcowe. Pracę zamyka spis literatury zawierający 118 pozycji literatury zasadniczej oraz 9 pozycji literatury uzupełniającej. W pracy nie zamieszczono spisu rysunków i tabel. Przyjęty układ rozprawy, podział na rozdziały i podrozdziały, ma typową narrację dla prac doktorskich, którą oceniam jako przejrzystą i poprawną.

Rozdział pierwszy – Wprowadzenie – zawiera wzmianki o współczesnych trendach w rozwoju procesów produkcji oraz wymaganiach stawianych procesom obróbkowym, w tym procesom szlifowania. Wskazano na problemy występujące w procesach obróbki części o małej sztywności, w tym zwłaszcza w procesie szlifowania wałków o małej sztywności, a następnie skrótowo omówiono poszczególne rozdziały pracy.

Rozdział drugi zawiera przegląd literatury dotyczącej szlifowania wzdłużnego wałków o małej sztywności. W podrozdziale 2.1 Doktorant scharakteryzował klasyczne metody szlifowania wałków, tj. szlifowanie bezkłowe i szlifowanie wzdłużne kłowe wałków. W kolejnym podrozdziale 2.2 przedstawił innowacyjne odmiany wysokowydajnego szlifowania jednoprzęściowego wałków, w tym: szlifowanie głębokie z posuwem pełzającym – CFG (*Creep Feed Grinding*), szlifowanie ściernicami wielowarstwowymi o zróżnicowanej budowie, szlifowanie wzdłużo-kształtowe i szlifowanie z ciągłym sterowaniem torem ściernicy oraz szlifowanie ze skośnym ustawieniem osi ściernicy. W kolejnych podrozdziałach omówiono pomiary siły w procesie szlifowania wzdłużnego (pkt. 2.3), emisję akustyczną w procesie szlifowania (pkt. 2.4), zużycie ściernicy (pkt. 2.5), odkształcenia sprężyste układu OUPN oraz odchyłki kształtu i wymiaru szlifowanych przedmiotów. Zabrakło podsumowania i wniosków wynikających z przeprowadzonej analizy literatury, uzasadniających podejmowaną tematykę badawczą. Ponadto zbyt powierzchownie potraktowano omówienie wyników badań dotyczących jednoprzęściowego szlifowania wałków o małej sztywności.

Rozdział trzeci zawiera cel, tezę i zakres pracy. Zarówno cel pracy, jak i jej teza, sformułowane są zbyt ogólnikowo. W opisie celu pracy pominięto bowiem zawarty w jej tytule problem małej sztywności szlifowanych wałków. Sformułowana teza nie ujawnia istoty opracowywanej strategii sterowania dosuwem ściernicy do przedmiotu. Zaprezentowany zakres pracy można uznać za poprawny i kompletny, jakkolwiek nie w pełni odzwierciedlający spis treści.

Rozdział czwarty zawiera opis metody szlifowania wałków z korekcją toru ruchu ściernicy. Przedstawiono w nim m.in.: schemat blokowy układu sterowania torem ruchu ściernicy, algorytm sterowania, zależność funkcyjną opisującą zależność między dosuwem ściernicy w dowolnym punkcie szlifowanego wałka, a odkształceniem sprężystym OUPN, powodowanym składową normalną siłą szlifowania. Opracowana zależność funkcyjna posłużyła do opracowania programu sterującego NC torem ruchu ściernicy w procesie szlifowania. Kod źródłowy opracowanego programu sterującego NC przedstawiono w załączniku. Zaproponowano następnie strategię wejścia i odjazdu ściernicy od szlifowanego wałka. Dyskusyjnym jest wyodrębnienie w tym rozdziale pojedynczego podrozdziału 4.1.

Rozdział piąty – Badania doświadczalne – zawiera trzy podrozdziały opisujące: obiekt badań (pkt. 5.1), stanowisko badawcze i urządzenia pomiarowe (pkt. 5.2), warunki realizacji badań doświadczalnych (pkt. 5.3) oraz pojedynczy podrozdział 5.4 obejmujący wyniki badań doświadczalnych. Podrozdziały 5.1÷5.3 powinny być wyłączone z tego rozdziału i zamieszczone jako odrębny rozdział np.: *Metodyka i warunki badań*. Inne uwagi szczegółowe do podrozdziałów 5.1÷5.3 dotyczą:

- rysunek 5.1 ilustrujący obiekt badań jest niekompletny, ponieważ nie ujawnia szeregu istotnych wielkości wejściowych, względnie stałych lub zakłócających, które są integralnie związane z obiektem badań. Prezentowany obiekt badań nie zawiera m.in.: prędkości szlifowania ściernicy, prędkości szlifowania wałka, prędkości posuwu osiowego, charakterystyki technicznej ściernicy, warunków obciążania ściernicy, rodzaju materiału i wymiarów szlifowanych próbek itd. Można się jednak doszukać informacji o przyjętych zakresach tych wielkości w podrozdziale 5.3;
- wątpliwość budzi zapis na str. 59¹: „Rejestrowane w programie sygnały sił ... były sumowane”. Niejasne jest, w jakim celu sumowano sygnały siły na kle konika i kle wrzeciennika;

- dyskusyjnym jest zamieszczenie w rozdziale 5 podpunktu 5.2.2. *Pomiar emisji akustycznej*. W opisie obiektu badań (rys. 5.1) nie wyszczególniono bowiem w wielkościach wyjściowych obiektu pomiaru emisji akustycznej;
- wyjaśnienia wymaga sposób pomiaru zarysu ściernicy (p. pkt 5.2.4). W opisie nie ujawniono bowiem sposobu pomiaru zarysu ściernicy czujnikiem indukcyjnym (nie wiadomo, czy był to pomiar stykowy, czy bezstykowy), jakie były kształt i wymiary końcówki pomiarowej czujnika, jaka jest siła nacisku czujnika na ściernicę i jej wpływ na zużycie końcówki oraz dokładność pomiaru zarysu ściernicy;
- dyskusyjnym jest zamieszczenie w rozdziale 5 opisowego podrozdziału 5.2.6: *Stosowane analizy statystyczne*, który powinien być załącznikiem do pracy;
- wątpliwość budzi również przyjęty w pracy trzyetapowy program badań doświadczalnych, w którym nie uwzględniono eksperymentu planowanego.

Wyniki badań doświadczalnych przedstawiono w czterech podrozdziałach (5.4.1÷5.4.4). W podrozdziale 5.4.1 zawarto obszerne wyniki badań pierwszego etapu dotyczące wpływu korekcji toru ruchu ściernicy i posuwu osiowego na odchyłkę walcowości i chropowatość powierzchni szlifowanych wałków oraz składową normalną siłę szlifowania i zużycie promieniowe ściernicy. Oceny wpływu korekcji toru ruchu ściernicy i posuwu osiowego na wymienione wielkości wyjściowe dokonano na podstawie porównania z wynikami badań uzyskanych w procesie szlifowania konwencjonalnego, tj. szlifowania bez korekcji toru ruchu ściernicy. Przeprowadzona analiza porównawcza przekonywająco potwierdziła zalety szlifowania z korekcją toru ruchu ściernicy, polegające głównie na istotnym zmniejszeniu odchyłek walcowości i zwiększeniu dokładności wymiarów szlifowanych wałków.

W kolejnym podrozdziale 5.4.2 przedstawiono wyniki drugiego etapu badań, które dotyczą wpływu korekcji toru ruchu ściernicy i głębokości szlifowania na odchyłkę walcowości i chropowatość powierzchni szlifowanych wałków oraz składową normalną siłę szlifowania i zużycie promieniowe ściernicy. Analiza porównawcza uzyskanych wyników również potwierdziła zalety szlifowania z korekcją toru ruchu ściernicy, w porównaniu do konwencjonalnego procesu szlifowania wałków. Zastosowanie korekcji toru ruchu ściernicy spowodowało bowiem zmniejszenie odchyłek walcowości o ponad 70% oraz istotną poprawę dokładności szlifowanych wałków (zmniejszenie odchyłek wymiaru o około 90%), w porównaniu do szlifowania bez korekcji toru ruchu ściernicy.

Podrozdział 5.4.3 zawiera opracowane równania regresji i modele, które opisują wpływ posuwu osiowego i głębokości szlifowania na wybrane wielkości wyjściowe procesu szlifowania wałków z korekcją i bez korekcji toru ruchu ściernicy. Opracowane równania regresji i modele dotyczyły w szczególności przebiegów: składowej normalnej siły szlifowania, zużycia objętościowego ściernicy, chropowatości powierzchni oraz odchyłek walcowości w procesach szlifowania wałków z korekcją i bez korekcji toru ruchu ściernicy. Wielomianowa postać tych równań oraz prezentowane modele mają znaczenie poznawcze.

W podrozdziale 5.4.4 przedstawiono wyniki badań wpływu zużycia ściernicy w okresie jej trwałości na przebieg procesu szlifowania wałków z korekcją toru ruchu ściernicy i porównawczo bez korekcji toru ruchu ściernicy. Dotyczą one w szczególności: oceny wpływu posuwu osiowego i głębokości szlifowania na dokładność wymiarową szlifowanych wałków, odchyłkę walcowości, chropowatość powierzchni, składowe siły szlifowania, poziom emisji akustycznej oraz zużycie ściernicy. Analiza porównawcza uzyskanych wyników potwierdziła istotne zalety szlifowania z korekcją toru ruchu ściernicy, w porównaniu do konwencjonalnego procesu szlifowania wałków. W szczególności dotyczy to istotnego zwiększenia dokładności wymiarowej szlifowanych wałków oraz zmniejszenia ich odchyłek walcowości. Niejasne pozostaje jednak przyjęte kryterium oceny trwałości ściernicy (wzrost siły normalnej o 50% w stosunku do szlifowania pierwszego przedmiotu) oraz celowość zamieszczenia wyników badań poziomu emisji akustycznej.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie i wnioski końcowe. W początkowej jego części sformułowano sześć wniosków wynikających z analizy literatury, a dotyczących problemów związanych z szlifowaniem wałków o małej sztywności, a następnie opisano zastosowaną w pracy strategię sterowania torem ruchu ściernicy. Ten fragment pracy należało zamieścić we wcześniejszym rozdziale dotyczącym analizy literatury, np. w zakończeniu rozdziału 2. W zakończeniu tego rozdziału poprawnie sformułowano 14 wniosków wynikających z przeprowadzonych badań doświadczalnych. Sformułowane wnioski końcowe mają różny stopień ważności i szczegółowości, lecz potwierdzają osiągnięcie przez Doktoranta zamierzonych celów naukowych rozprawy. Niedosyt budzi brak uszeregowania wniosków oraz niedokonanie ich podziału na wnioski poznawcze i utylitarne.

Rozdział siódmy – Literatura – zawiera 158 pozycji bibliograficznych pochodzących z artykułów w czasopismach krajowych i zagranicznych, referatów zamieszczonych w materiałach konferencji zagranicznych i krajowych oraz monografii, książek i podręczników. Wśród zamieszczonych pozycji literatury 33 są z okresu ostatnich 8 lat (ponad 20%). Doktorant zamieścił także dwie prace, których jest współautorem. Poszczególne

pozycje bibliograficzne są na ogół właściwie dobrane i poprawnie cytowane w tekście monografii.

3. Ocena strony redakcyjnej

Oceniając rozprawę doktorską pod względem redakcyjnym warto zauważyć, że tytuł rozprawy odzwierciedla jej treść, a układ pracy oraz jej podział na rozdziały i podrozdziały są poprawne. Rozprawa napisana jest na ogół poprawnie pod względem językowym, jednak Doktorant nie ustrzegł się błędów gramatycznych, interpunkcyjnych, niefortunnnych sformułowań i określeń oraz innych uchybień. Poniżej przytoczono przykłady takich błędów:

- stosowanie skrótów w środku zdania, np.: str. 17₁ – „*Na rys. 2.3. ...*”, str. 19₂ – „*Na rys. 2.4.*”, str. 25³ – „*Jak widać na rys. 2.8., ...*”, str. 33¹³ – „*... przedstawiono na rys. 2.14.*”, str. 35₆ – „*... przedstawiono na rys. 2.16.*”, str. 71⁶ – „*... przedstawiono na rys. 5.12.*”; str. 85⁸ – „*... w przypadku Ra wyniosły ok. 0,2÷0,25μm, a w przypadku Rz ok. 2μm ...*”;
- stosowanie nieadekwatnych określeń, np.: str. 11₆ – „*... przy niskich parametrach obróbki ...*”, Rys. 5.3 poz. 5 – „*czujnik indukcyjny do pomiaru profilu wałka*”, Rys. 5.4. poz. 6 i 7 – „*wzmacniacze ładunku*”, Rys. 5.12. – „*Odchyłki tworzących szlifowanych przedmiotów ...*”; str. 96₃ – „*Na rys. 5.31. przedstawiono przebiegi odchyłek tworzących powierzchni szlifowanych ...*”, str. 111⁴ – „*Naddatek obróbkowy jest podzielony na poszczególne etapy procesu ...*”;
- rozpoczynanie zdań od słowa „*Następnie*” ..., np.: str. 70⁶, str. 72⁶, str. 105³ oraz „*Natomiast ...*” np.: str. 85⁶, str. 86⁵, str. 99⁴;
- nieprecyzyjne określenie sztywności układu szlifowania OPN zamiast OUPN.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska wnosi wartości poznawcze i aplikacyjne w zakresie kłowego szlifowania wałków o małej sztywności. Zawarte w recenzji uwagi krytyczne mają na ogół charakter dyskusyjny, do których Doktorant może odnieść się podczas publicznej obrony.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam:

- zaprojektowanie stanowiska badawczego do realizacji procesu szlifowania wałków o małej sztywności, polegającą na zastosowaniu autorskiej metody korekcji toru ruchu ściernicy,
- opracowanie zbioru równań regresji i modeli opisujących wpływ posuwu osiowego i głębokości szlifowania na wybrane wielkości wyjściowe procesu szlifowania

wałków z korekcją toru ruchu ściernicy oraz porównawczo szlifowania konwencjonalnego bez korekcji toru ruchu ściernicy,

- opracowanie strategii sterowania torem ruchu ściernicy w procesie wzdłużnego szlifowania wałków o małej sztywności oraz kodu źródłowego programu komputerowego NC do realizacji tej strategii szlifowania,
- sformułowanie wniosków o znaczeniu poznawczym i utylitarnym oraz wytycznych do doskonalenia procesu szlifowania wałków o małej sztywności.

4. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Pawła Sułkowicza zawiera samodzielne opracowanie zagadnienia naukowego. Autor wykazał się wymaganą wiedzą oraz umiejętnością prowadzenia badań naukowych i przedstawiania wyników.

Na podstawie przedstawionej oceny stwierdzam, że opiniowana praca mgr inż. Pawła Sułkowicza spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w art. 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. i może stanowić podstawę do ubiegania się o stopień naukowy doktora w dziedzinie Budowa i Eksploatacja Maszyn.

Wnioskuje o dopuszczenie mgra inż. Pawła Sułkowicza do publicznej obrony przedstawionej rozprawy doktorskiej.

Łódź, dn. 09. 11. 2020 r.



dr hab. inż. Marcin Gołabczak, prof. uczelni