

Łódź, dn. 25. 10. 2023 r.

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

**Recenzja
pracy doktorskiej mgr inż. Adriana Kopytowskiego
pt.: „Badanie procesu szlifowania powierzchni z zastosowaniem wielogranulacyjnych
tarcz ściernych”**

*Recenzja opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego
Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Chmielewskiego, z dn. 09.08.2023 r.*

1. Ocena wyboru tematu

Szlifowanie ściernicowe pozostaje nadal 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 szlifowanych powierzchni oraz zwiększenia produktywności i elastyczności produkcji, zintensyfikował prace badawcze nad doskonaleniem innowacyjnych sposobów szlifowania oraz wdrażaniem nowych ściernic, w tym ściernic: supertwardych, hybrydowych o zróżnicowanej charakterystyce technicznej oraz ściernic wielogranulacyjnych.

Recenzowana rozprawa wpisuje się w nurt wymienionych nowych kierunków badań procesów szlifowania. Celem rozprawy jest zbadanie wpływu wybranych parametrów technologicznych procesu szlifowania wielogranulacyjnymi ściernicami superstopu Inconel 625 na parametry struktury geometrycznej powierzchni oraz stan warstwy wierzchniej.

Oceniam podejmowaną w rozprawie problematykę badawczą 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 obszernej monografii zawierającej 172 strony, w tym: 89 rysunków i 15 tabel. Jej zasadniczą treść poprzedzają: podziękowania, streszczenia w języku polskim i angielskim, spis treści i wykaz stosowanych oznaczeń, po których następuje 5 rozdziałów merytorycznych z poprawnie wydzielonymi podrozdziałami, zakończonych podsumowaniem i wnioskami końcowymi. Pracę zamyka spis literatury, zawierający 281 pozycji bibliograficznych, spis rysunków i tabel oraz załącznik. Przyjęty układ rozprawy i jej podział na rozdziały i podrozdziały ma typową narrację dla prac doktorskich, którą oceniam jako przejrzystą i poprawną.

Rozdział pierwszy – Wstęp – zawiera skrótowe informacje o współczesnych wymaganiach stawianych procesom obróbkowym, trendach rozwoju procesów produkcyjnych oraz roli i znaczeniu procesów szlifowania w kształtowaniu przedmiotów wykonywanych z trudnoobrabialnych materiałów konstrukcyjnych, np. superstopu Inconel 625.

W **rozdziale drugim** przedstawiono obszerną analizę literatury dotyczącej podejmowanego tematu rozprawy (49 str.). Kolejne jego podrozdziały zawierają: ogólną charakterystykę procesu szlifowania (2.1), charakterystykę i mechanizm pracy ziarna ściernego (2.2), modelowanie procesu szlifowania (2.3), analizę korelacji pomiędzy parametrami procesu szlifowania a wynikowym stanem warstwy wierzchniej i wydajnością usuwania materiału (2.4), wybrane trendy w konstrukcji tarcz ściernych (2.5) oraz wnioski dotyczące analizy stanu badań obróbki szlifowania materiałów supertwardych (2.6). Prezentowana analiza literatury na ogół poprawnie odzwierciedla aktualny stan badań w obszarze podejmowanej rozprawy doktorskiej. Uwagi szczegółowe do tego rozdziału dotyczą:

- zbyt skrótowego potraktowania roli i znaczenia metod i warunków obciążania ściernic w kształtowaniu ich właściwości skrawnych ściernic,
- braku wyników badań dotyczących nowych, innowacyjnych metod szlifowania materiałów trudnoskrawalnych, np.: szlifowania ściernicami supertwardymi ze spoiwem metalowym, szlifowania z dużą prędkością ściernicy (*High Speed Grinding*), szlifowania z dużą prędkością przedmiotu (*Speed Stroke Grinding*), szlifowania wysoko wydajnego (*High Efficiency Deep Grinding*) oraz szlifowania hybrydowego wykorzystującego różne formy energii,
- pominięcia badań dotyczących rozwoju nowych ściernic, np.: ściernic z mikro- i nanokrystalicznego korundu spiekane, ściernic hybrydowych o zróżnicowanej charakterystyce technicznej,

- poprawności rysunku 10 wyjaśniającego trajektorię ziarna ściernego w procesie szlifowania płaszczyzn.

Wymienione uwagi mają charakter dyskusyjny, do których Doktorant może odnieść się podczas publicznej obrony rozprawy.

Rozdział trzeci zawiera uzasadnienie podjęcia tematu, cel i zakres pracy. Cel pracy sformułowany jest poprawnie i odzwierciedla tytuł rozprawy, a jej zakres jest za poprawny i kompletny. Brakuje natomiast sformułowania hipotezy badawczej, którą Doktorant zamierza udowodnić w rozprawie.

W **rozdziale czwartym** przedstawiono poprawny opis warunków i metodykę badań realizowanych doświadczalnych. W początkowym podrozdziale (4.1) zamieszczono opis szlifierki do płaszczyzn SPC-20 (pkt. 4.1.1) oraz wykorzystywanej w badaniach aparatury pomiarowej: profilometr Taylor Hopson FORMAT TALSURF 2 (pkt. 4.1.2), skaningowy mikroskop elektronowy Joel JCM-7000 Neoscope (pkt. 4.1.3), mikroskop elektronowy z emisją połówową (FE-SEM) (pkt. 4.1.4), mikroskop cyfrowy Keyence VHX (pkt. 4.1.5) oraz twardościomierz Nexus 423D (pkt. 4.1.6). W kolejnym podrozdziale (4.1) poprawnie opisano metodologię badań doświadczalnych oraz zamieszczono przykładowe wyniki pomiarów chropowatości powierzchni próbek z superstopu Inconel 625, uzyskiwane po szlifowaniu ściernicą konwencjonalną i ściernicą wielogranulacyjną. W podrozdziale (4.3) zamieszczono charakterystykę składu chemicznego i właściwości fizyko-mechaniczne superstopu Inconel 625 (pkt. 4.3.1), porównania budowy ceramicznych ściernic wielogranulacyjnych firmy Norton Saint - Gobain z ściernicami o konwencjonalnej strukturze oraz metodę określenia licznosci ziaren aktywnych porównywanych ściernic w procesie szlifowania (pkt. 4.3.2). W zakończeniu tego rozdziału opisano eksperyment planowany oraz zastosowany w badaniach doświadczalnych pięciopoziomowy plan Hartley'a (4.4).

W **rozdziale piątym** przedstawiono wyniki badań doświadczalnych szlifowania Inconelu 625, które obejmują: ocenę morfologii powierzchni szlifowanych próbek (5.1), badania mikrotwardości i warstwy zmienionej szlifowanych próbek (5.2), charakterystykę cech trybologicznych powierzchni próbek po szlifowaniu (5.3), badania wpływu parametrów szlifowania na parametry chropowatości powierzchni (5.4) oraz porównanie morfologii czynnej powierzchni ściernicy konwencjonalnej i wielogranulacyjnej przed i po procesie szlifowania (5.5).

W podrozdziale 5.1 zamieszczono porównanie obrazów SEM i profilogramów topografii powierzchni próbek po szlifowaniu ściernicą konwencjonalną i ściernicą wielogranulacyjną, w warunkach stosowania trzech różnych prędkości szlifowania ($v_s = 33 \text{ ms}^{-1}$, 23 ms^{-1} , 13 ms^{-1}).

W obszernej dyskusji prezentowanych wyników omówiono istotne różnice w ukształtowaniu morfologii i topografii powierzchni szlifowanych próbek, uzyskiwanych w poszczególnych próbach szlifowania.

W kolejnym podrozdziale 5.2 zamieszczono opis metodyki pomiaru mikrotwardości warstwy wierzchniej (WW) i warstwy zmienionej szlifowanych próbek oraz wybrane wyniki oceny tych parametrów, na podstawie zamieszczonych wykresów mikrotwardości powierzchni WW oraz obrazów SEM powierzchni próbek, po szlifowaniu ściernicą konwencjonalną i ściernicą wielogranulacyjną w warunkach stosowania trzech różnych prędkości szlifowania ($v_s = 33 \text{ ms}^{-1}$, 23 ms^{-1} , 13 ms^{-1}). Przeprowadzono następnie analizę prezentowanych wyników badań, ujawniając istotne różnice w kształtowaniu stanu WW w procesach szlifowania stopu Inconelu 625 ściernicą konwencjonalną i wielogranulacyjną. Wskazane byłoby jednak sformułowanie wniosków wynikających z tej części badań.

Podrozdział 5.3 zawiera charakterystykę trybologicznych cech powierzchni próbek Inconelu 625 po szlifowaniu ściernicą konwencjonalną i ściernicą wielogranulacyjną. Trybologiczne cechy powierzchni szlifowanych próbek oceniano na podstawie analizy wykresów krzywej Abbota-Firestone'a, krzywej objętościowego udziału nośnego powierzchni, parametrów udziału nośnego: S_{vk} , S_k , S_{pk} , S_{r1} , S_{r2} , V_{mp} , V_{mc} , V_{vc} , V_{vv} oraz porównania obrazów morfologii kształtowanych bruzd na powierzchni próbek po szlifowaniu ściernicą konwencjonalną i wielogranulacyjną. Wyjaśnienia wymagają załączone wykresy na rys. 67÷67, które opatrzone identycznymi podpisami zawierającymi takie same warunki szlifowania. Dyskusyjnym jest również przyjęta w badaniach doświadczalnych zbyt mała prędkość szlifowania (15 ms^{-1}), która jest znacząco mniejsza od konwencjonalnych prędkości szlifowania ($30\div45 \text{ ms}^{-1}$) oraz szlifowania szybkościowego.

W podrozdziale 5.4 zamieszczono obszerny opis wyników badań (26 str.), dotyczących oceny wpływu parametrów i warunków szlifowania stopu Inconel 625 ściernicą konwencjonalną i wielogranulacyjną na wybrane parametry chropowatości powierzchni. Prezentowane wyniki badań zawierają: opracowane modele statystyczne w postaci wielomianowych równań regresji opisujących wpływ prędkości szlifowania - v_s , prędkości posuwu wzdłużnego - v_w i posuwu poprzecznego - v_p na wybrane parametry chropowatości powierzchni (Ra , Sa , Rz , Sp , Sv i Sz), miary rozrzutu wyników i parametry statystyczne tych równań oraz wykresy ilustrujące zależności pomiędzy parametrami szlifowania a parametrami chropowatości powierzchni szlifowanych próbek ze stopu Inconel 625. Prezentowane wyniki, modele i równania regresji oraz wykresy opatrzone są logiczną dyskusją i stosownymi komentarzami. Dyskusyjnym jest praktyczna przydatność opracowanych

wielomianowych równań regresji. Brakuje podsumowania oraz wniosków wynikających z tego etapu badań.

W zakończeniu rozdziału piątego zamieszczono opis zaobserwowanych różnic w morfologii pomiędzy czynną powierzchnią ściernicy konwencjonalnej i ściernicy wielogranulacyjnej przed procesem szlifowania i po nim (5.5). Zamieszczono m.in. obrazy SEM powierzchni czynnej porównywanych ściernic w różnych okresach ich stępienia oraz logiczną interpretację zachodzących procesów ich zużycia CPS.

W *rozdziale szóstym* zawarto podsumowanie i wnioski końcowe oraz wskazano kierunki dalszych badań w obszarze realizowanej rozprawy doktorskiej. Sformułowano 8 wniosków użytecznych i poznawczych, które mają zróżnicowany stopień ważności i szczegółowości, jednak potwierdzają one osiągnięcie przez Doktoranta zamierzonych celów naukowych rozprawy. Niedosyt budzi brak podziału wniosków na wnioski poznawcze i użyteczne.

Rozdział siódmy – Literatura – zawiera 281 pozycji bibliograficznych pochodzących z artykułów w czasopiśmie krajowych i zagranicznych, referatów zamieszczonych w materiałach konferencji zagranicznych i krajowych oraz monografiach, książkach i podręcznikach. Należy podkreślić, że zamieszczona bibliografia jest aktualna, ponieważ zdecydowana większość pozycji pochodzi z okresu ostatnich 6 lat. Należy podkreślić, że wśród zamieszczonej bibliografii jest 5 współautorskich publikacji Doktoranta. Poszczególne pozycje bibliograficzne są właściwie dobrane i na ogół poprawnie cytowane w tekście monografii.

3. Ocena strony redakcyjnej

Oceniając rozprawę doktorską pod względem redakcyjnym należy podkreślić, że tytuł rozprawy odzwierciedla jej treść, układ pracy i jej podział na rozdziały i podrozdziały jest poprawny, a zamieszczone rysunki i wykresy są czytelne. Rozprawa napisana jest na ogół poprawnie pod względem językowym, Doktorant nie ustrzegł się jednak błędów interpunkcyjnych, niefortunnych sformułowań i określeń oraz innych uchybień edytorskich. Wybrane przykłady takich błędów przytoczono poniżej:

- niefortunne sformułowania i określenia, np.: str. 15₇ – „...gładkiej powierzchni materiału...”; str. 15₃ – „...zdjąć pozostawiony naddatek ...”; str. 19₃ – „...polega ono na zaostreniu ziaren ściernych...”; str. 25₅ – „...używa się kamienia szlifierskiego ...”; str. 29₆ – „Po wibracji centralna współrzędna dolnej powierzchni...”; str. 84¹³ – „...ziarna ściernie mocno wystają ponad inne...”; str. 108₇ „...spowodowane efektem orki podczas szlifowania...”;

- uchybienia edytorskie, np.: stosowanie angielskich opisów na prezentowanych rysunkach: rys. 13, 16, 34÷39, 54, 55; stosowanie kropek w zakończeniu podpisów rysunków i tabel.

Zawarte w recenzji uwagi krytyczne mają na ogół charakter dyskusyjny, do których Doktorant może odnieść się podczas publicznej obrony.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska wnosi istotne wartości poznawcze i aplikacyjne w zakresie szlifowania powierzchni superstopu Inconel 625 ściernicami wielogranulacyjnymi.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam:

- zaprojektowanie i wykonanie stanowiska badawczego do realizacji badań procesu szlifowania płaszczyzn superstopu Inconel 625 nowymi ściernicami wielogranulacyjnymi;
- zastosowanie właściwej metodyki badań oraz dobór nowoczesnej aparatury pomiarowej do oceny tego procesu;
- opracowanie modeli i zbioru równań regresji opisujących wpływ parametrów technologicznych procesu szlifowania superstopu Inconel 625 na morfologię i chropowatość powierzchni szlifowanych próbek oraz morfologię CPS ściernic wielogranulacyjnych;
- sformułowanie logicznych wniosków o znaczeniu poznawczym i użytkowym.

4. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Adriana Kopytowskiego zawiera samodzielne opracowanie zagadnienia naukowego. Autor wykazał się wymaganą wiedzą oraz umiejętnością w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz przedstawiania uzyskanych wyników badań.

Na podstawie przedstawionej oceny stwierdzam, że opiniowana praca mgr inż. Adriana Kopytowskiego spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w: art. 14 ust. 1 oraz ust. 2 pkt. 2 i art.12 ust. 1 i 2 Ustawy z dn. 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789 ze zm.) oraz § 3 ust. 1 i § 6 ust. 1-2 rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dn. 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r., poz. 261), w związku z art. 179 ust. 1-3 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669 ze zm.) i rozporządzenie

Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych (Dz. U. z 2018 r., poz. 1818).

Rozprawa doktorska mgr inż. Adriana Kopytowskiego może stanowić podstawę do ubiegania się o stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Adriana Kopytowskiego do publicznej obrony przedstawionej rozprawy doktorskiej.

Biorąc pod uwagę bardzo obszerny zakres zrealizowanych badań eksperymentalnych, wykazane w recenzji osiągnięcia naukowe oraz 5 współautorskich publikacji Doktoranta, wnioskuje także o wyróżnienie rozprawy.



Łódź, dn. 25.10.2023 r.

dr hab. inż. Marcin Gołębczak, prof. uczelni