

dr hab. inż. Tomasz Paczkowski, prof. PBŚ
Politechnika Bydgoska
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Katedra Technik Wytwarzania
Al. Prof. S. Kaliskiego 7
85-796 Bydgoszcz

Bydgoszcz, 26.09.2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej zatytułowanej:

Badania procesu szlifowania powierzchni z zastosowaniem wielogranulacyjnych tarcz ściernych

Autor: **mgr inż. Adrian Kopytowski**

Promotor: **dr hab. inż. Rafał Świercz, prof. uczelni**

Niniejsza recenzja opracowana została na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Warszawskiej, prof. dr hab. inż. Tomasza Chmielewskiego, pismem z dnia 9.08.2023 r.

1. Charakterystyka pracy – ocena formalna

Recenzowana praca zawiera 172 stron w tym 160 tekstu zasadniczego, obejmujące 6 rozdziałów, spis treści, wykaz symboli, akronimów i definicji oraz zestawienie bibliografii składającej się z 281 pozycji literaturowych, do których Autor odwołuje się w dysertacji. W pracy zamieszczono 89 rysunków, 15 tabel, 47 wzorów w tym 11 opracowanych przez Autora równań regresji.

Problematyka rozprawy dotyczy zagadnień związanych z procesem szlifowania superstopu Inconel 625 wielogranulacyjnymi tarczami ściernymi oraz określeniem wpływu wybranych parametrów tego procesu na efekty obróbki.

Szlifowanie, jako jeden z ważniejszych i najbardziej rozpowszechnionych procesów obróbki wykończeniowej, jak również wysoko wydajnej – będącej sposobem usuwania nadatku obróbkowego, stanowi znaczący udział w procesach wytwarzania części maszyn. Z tego powodu istotne znaczenie ma właściwy i świadomy dobór warunków szlifowania przez użytkownika, szczególnie biorąc pod uwagę ilość i różnorodność użytkowanych

narzędzi ściernych i szlifowanych materiałów. Nie bez znaczenia pozostaje również możliwość aktywnego wpływu użytkowników narzędzi ściernych na programy produkcyjne wiodących producentów, a także konstrukcję narzędzi ściernych tak, aby sprostać rosnącym wymaganiom rynku z zakresu wydajności i cech użytkowych powierzchni szlifowanych. Należy również dodać, że właściwy dobór warunków, a w szczególności ściernicy i parametrów kinematycznych procesu, ma zasadnicze znaczenie dla uzyskiwania satysfakcjonującej wydajności obróbki oraz minimalizowania niekorzystnych oddziaływań na przedmiot obrabiany, a także powtarzalności uzyskiwanych efektów szlifowania.

Podjęcie się przez Autora przeprowadzenia wszechstronnych badań procesu szlifowania tarczami wielogranulacyjnymi nowej konstrukcji materiału trudnoobrabialnego jest w świetle dokonanych analiz i przytoczonych informacji w pełni uzasadnione. Należy podkreślić, że badanie procesów i operacji obróbkowych jest zawsze podstawowym czynnikiem rozwoju procesów wytwórczych, ich optymalizacji i doskonalenia jakości wyrobów.

Wybór tematu uważam również za właściwy, nie tylko z utylitarnego, ale przede wszystkim z poznawczego punktu widzenia. O aktualności wybranego tematu świadczy również cytowana przez Autora literatura, która to w większości pochodzi z ostatniego dziesięciolecia.

Rozprawa ma charakter doświadczalny, ponieważ główną jej wartością są wykonane badania dotyczące wpływu prędkości szlifowania i prędkości posuwowych oraz wielkości ziaren ściernych w tarczy wielogranulacyjnej na strukturę geometryczną powierzchni, co opisane zostało w rozdziałach 4 i 5. Rozdział 3, poprzedzający część badawczą pracy, zawiera cel i zakres pracy oraz w oparciu o zamieszczone w pracy pozycje literaturowe, uzasadnienie podjęcia tematu. Zakres pracy Autor zawarł w ośmiu punktach, z których zdaniem oceniającego najważniejsze dotyczą:

- badań doświadczalnych pozwalających na określenie wpływu głównych technologicznych parametrów obróbki szlifowaniem oraz rodzaju zastosowanych tarcz ściernych na wybrane cechy struktury geometrycznej powierzchni,
- opracowania statystycznych modeli matematycznych opisujących wpływ parametrów procesu szlifowania na wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni.

Wprowadzenie w temat oraz opis zagadnień dotyczących procesu szlifowania, pracy ziarna ściernego, modelowania procesu szlifowania oraz trendy w konstrukcji tarcz ściernych zostały opisane odpowiednio w rozdziałach 1 i 2. We wprowadzeniu do rozprawy Doktorant w zwięzły sposób przedstawił problematykę poruszanego zagadnienia.

W rozdziale 2 Autor opisał stan zagadnienia obejmujący charakterystykę obróbki szlifowaniem. Szczegółowo opisuje zjawiska fizyczne, determinujące proces usuwania materiału i ich wpływ na własności powstałej warstwy wierzchniej akcentując istotne dla jej rozwoju prowadzone badania. W kolejnych podrozdziałach opisał metody modelowania matematycznego procesu szlifowania oraz symulacje topografii powierzchni ściernicy.

W rozdziale tym opisał również trendy w konstrukcji tarcz ściernych wykazując, że jest to istotny element w rozwoju technologii szlifowania szczególnie materiałów trudnoobrabialnych.

W rozdziałach tych tzn. 1 i 2, a szczególnie w rozdziale 2, Doktorant odnosi się do stanu wiedzy i techniki w obszarze podjętej tematyki pracy. Rozdziały 4 i 5 dotyczą wspomnianych wcześniej badań doświadczalnych. W rozdziałach tych opisano metodologię i badania doświadczalne wspomnianego wcześniej procesu szlifowania z zastosowaniem wielo granulacyjnych tarcz ściernych.

Rozdział 4 zawiera szczegółowy opis warunków i metodyki badań doświadczalnych. W rozdziale 5 Autor przedstawił wyniki badań w postaci licznych wykresów przestrzennych utworzonych na podstawie opracowanych równań regresji oraz współczynniki korelacji wielkości badanych do wielkości wejściowych. Każdą sekwencję badań Doktorant kończy podsumowaniem. Rozdział ten zawiera również analizę morfologii powierzchni tarczy przed i po obróbce. Posumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań zawarto w rozdziale 6 z podziałem na wnioski o charakterze użytkowym i poznawczym oraz do dalszych badań.

W podsumowaniu tej części opinii stwierdzam, że praca obejmuje zagadnienia technologiczne procesu szlifowania trudnoobrabialnego materiału z zastosowaniem nowej konstrukcji tarcz wielo granulacyjnych, analizę stanu struktury metalograficznej, metrologię powierzchni, planowania doświadczeń, użytkowania skomputeryzowanych systemów pomiarowych oraz akwizycję i statystyczną analizę wyników pomiarów.

Przyjęta przez Doktoranta struktura pracy jest poprawna, zawiera bowiem składniki wymagane w rozprawie doktorskiej. Proporcje pomiędzy ilością informacji zawartych w części literaturowej i doświadczalnej zostały dobrane właściwie i są typowe dla prac o charakterze doświadczalnym.

2. Ocena merytoryczna pracy

Praca doktorska mgr inż. Adriana Kopytowskiego poświęcona jest obróbce szlifowaniem materiału trudnoobrabialnego z wykorzystaniem nowej konstrukcji tarcz wielo granulacyjnych. Uważam, że temat pracy jest interesujący i aktualny. Opracowanie zawiera elementy nowości głównie w sferze użytkowej. Autor sformułował ciekawy problem, który został następnie poddany analizie teoretycznej i badaniom eksperymentalnym. Cel pracy „określenie wpływu wybranych parametrów technologicznych procesu szlifowania oraz warunków obróbki na wybrane cechy struktury geometrycznej powierzchni oraz stan warstwy wierzchniej superstopu Inconel 625”, należy ocenić jako poprawnie sformułowany.

Szlifowanie ściernicowe leży w polu zainteresowań wielu naukowców z całego świata. Głównym celem wszystkich prowadzonych badań jest ustalanie warunków procesu tak, aby spełnić określone wymagania dotyczące przedmiotu obrabianego i samego procesu obróbkowego, stąd większość publikacji w mniejszym lub większym stopniu dotyczy relacji pomiędzy warunkami szlifowania a czynnikami procesu. Na potrzeby przeprowadzania analiz

tworzy się modele i wykorzystuje dostępne środki obliczeniowe w celu sprawdzenia poprawności opisu zjawisk. W zagadnieniach złożonych, jakim jest dobór warunków szlifowania, stosuje się sztuczną inteligencję i różnego rodzaju algorytmy oraz inne narzędzia. Wśród warunków szlifowania (zmiennych kontrolowanych) wyróżnia się czynniki związane ze ściernicą, obciążaczem i chłodziwem. Warunki obciążania mają istotny wpływ na siły szlifowania, zużycie ściernicy, chropowatość powierzchni obrobionej, energię właściwą szlifowania i integralność powierzchni ściernicy.

Z większością powyższych problemów wiąże się bezpośrednio opiniowana rozprawa.

Z uwagi na powyższe uważam, że jest w pełni uzasadniony wybór tematyki opiniowanej rozprawy nt. " Badania procesu szlifowania powierzchni z zastosowaniem wielogranulacyjnych tarcz ściernych".

Przystępując do eksperymentu, trzeba mieć wiedzę zarówno teoretyczną jak i z zakresu technik i metod badawczych. Autor pracy dokonał bardzo obszernego przeglądu literatury. Studium literaturowe zawarto w rozdziale drugim „Analiza stanu wiedzy”.

Pisząc tę część pracy Doktorant powinien nie tylko biernie przedstawiać cudze poglądy i wyniki badań ale podjąć próbę skomentowania obcych twierdzeń ich analizy i wyciągniętych wniosków. Autor powinien wykazać umiejętność zajmowania stanowiska krytycznego w stosunku do literatury, a w tej pracy tego zabrakło. Kolejna uwaga dotyczy zamieszczenia informacji o charakterze podstawowym. Czytając te fragmenty pracy można odnieść wrażenie, że czyta się monografię a nie rozprawę. W największym stopniu uwaga ta dotyczy opisanych badań dotyczących wskaźników i parametrów powiązanych z procesem szlifowania, a także ich wpływu na stan warstwy wierzchniej i struktury geometrycznej powierzchni po szlifowaniu. Problematyka ta wiąże się bezpośrednio z tematyką pracy. Należy jednak podkreślić, że Autor wnikliwie opracował tę część rozprawy. Faktycznie opisał zasadnicze aspekty i kierunki badań obróbki szlifowaniem. Należy także dodać, że dobór źródeł jest poprawny. Zawiera on 281 pozycji z czego, co należy podkreślić, większość publikacji jest z ostatniego dziesięciolecia w tym 4 publikacje współautorskie związane z tematyką rozprawy.

Podsumowanie przeglądu literatury zawarte jest w pkt. 2.6 „Wnioski ze stanu badań obróbki szlifowaniem materiałów trudnoobrabialnych” oraz pkt. 3.1 „Uzasadnienie podjęcia pracy”. Autor wskazuje w nich czynniki mające wpływ na efekty obróbki szlifowaniem oraz stwierdza, że „Korelacja zmiennych wejściowych z kluczowymi parametrami wyjściowymi, zwłaszcza w przypadku superstopów na bazie niklu podczas szlifowania, dotychczas nie została przedstawiona w sposób kompleksowy” oraz że „Zagadnienie obróbki mikroskrawaniem superstopu Inconel 625 za pomocą tarcz wielogranulacyjnych charakteryzuje złożoność warunków kontaktu pomiędzy przedmiotem obrabianym a ziarnami ściernymi i w świetle dostępnych publikacji nie zostały one scharakteryzowane”. Zdaniem oceniającego wnioski te są najważniejsze z punktu widzenia podjęcia tematu pracy.

Sformułowane w rozdziale 3 cel i zakres pracy zrealizowano na drodze badań eksperymentalnych. Doktorant zastosował poprawny układ prowadzenia badań naukowych,

polegający na analizie teoretycznej zagadnienia, opisie zjawisk obróbkowych, by na zakończenie zweryfikować je doświadczalnie. Eksperymenty technologiczne były przeprowadzone etapami. Najpierw wykonano badania wstępne – rozpoznawcze. Miały one na celu wyznaczenie brzegowych zakresów wartości parametrów technologicznych procesu szlifowania. Na podstawie wyników tych badań określono warunki procesu szlifowania, co pozwoliło przeprowadzić badania zasadnicze. Należy jednak dodać, że na temat badań wstępnych nie ma żadnego opisu jak je przeprowadzono, w ilu powtórzeniach i czy może przeprowadzono je zgodnie z teorią eksperymentu w celu wyznaczenia również poziomu istotności dla przyjętych parametrów. Opis wykorzystanej aparatury badawczej oraz stanowiska badawczego zamieszczono w rozdziale 4. Tutaj podobnie jak to miało już miejsce w rozdziale 2 „Analiza stanu wiedzy” Doktorant zamieścił szczegółowe opisy budowy i zasady działania wykorzystanej aparatury do badań. Tego typu informacje, zdaniem oceniającego, nie powinna zawierać praca typu rozprawa naukowa w tym przypadku doktorska. Do badań użyto próbki z materiału trudnoobrabialnego Inconel 625. Użyty w eksperymencie materiał na próbki i rodzaje tarcz ściernych zostały przez Autora pracy uzasadnione. Wyniki badań zaprezentowano w rozdziale 5.

W wyniku badań w ramach eksperymentu planowanego otrzymano wpływ wybranych parametrów i warunków obróbki szlifowania na parametry chropowatości powierzchni, takie jak: R_a , S_a , R_z , S_z , S_v , S_p . Dodatkowo przeprowadzono badania morfologii powierzchni, mikrotwardości warstwy zmienionej oraz badania cech tribologicznych uzyskanych powierzchni. Dokonano również morfologii powierzchni tarczy ściernej przed i po obróbce. Poszczególne sekwencje badań Autor podsumowuje w postaci komentarzy wyjaśniających uzyskane wyniki oraz prezentuje na licznych wykresach.

Zrealizowane testy, ich opracowanie, wykazały dobrą znajomość metod badawczych oraz umiejętność prowadzenia prac doświadczalnych.

Uważam, że rozdział 5 a w szczególności podrozdział 5.4 stanowi najważniejszą część pracy i z nimi wiąże się oryginalny wkład mgr inż. Adriana Kopytowskiego w rozwój technologii obróbki materiałów trudnoobrabialnych metodą obróbki szlifowaniem. Podsumowując do elementów nowości naukowej stanowiących oryginalny dorobek Doktoranta zaliczam:

- Opracowanie równań regresji i analiza uzyskanych wyników badań wpływu parametrów i warunków obróbki szlifowania na parametry chropowatości powierzchni.
- Analiza pracy i zużycia wielogranulacyjnych tarcz ściernych.

Ważniejsze uwagi krytyczne, oraz pod dyskusję, w odniesieniu do badań, dotyczą w szczególności zagadnień wymienionych poniżej:

- Tylko zasygnalizowane i niezilustrowane w postaci np. wykresów, morfologii powierzchni czy tabel badania wstępne. Zgodnie z informacją podaną w pracy badania wstępne posłużyły do wyznaczenia brzegowych zakresów wartości parametrów technologicznych procesu szlifowania. Te brzegowe zakresy zmienności

zostały określone dla wcześniej przyjętych parametrów niezależnych w badaniach, gdyż Doktorant w ramach badań wstępnych nie wyznaczył istotności tych parametrów w celu np. eliminacji któregoś z nich.

- Pewne wątpliwości budzi zawężenie wyboru zmiennych niezależnych w badaniach do parametrów związanych z prędkością skrawania i prędkościami posuwowymi. Dobierając warunki szlifowania ze względu na strukturę geometryczną powierzchni obrobionej analizie poddawane są również wielkości związane z obszarem kontaktu ziarno ściernie - przedmiot obrabiany czyli z parametrem powiązany z wartością dosuwu. W pracy parametr ten oznaczony symbolem a_p (głębokość skrawania) w badaniach przyjęto na stałym poziomie.
- Wątpliwości budzi również fakt czy w ramach badań porównawczych dwóch rodzajów tarcz ściernych o różnej budowie (tarcza konwencjonalna i wielogranulacyjna) można przyjąć tą samą wartość dosuwu. Należy tutaj dodać, że parametrami rozstrzygającymi były parametry chropowatości czyli efekty obróbki. Być może dla różnych wartości dosuwu dla porównywanych tarcz ściernych wartości chropowatości byłyby zbliżone.
- Często używanymi parametrami opisującymi proces szlifowania są: składowe siły szlifowania, energia właściwa szlifowania i współczynnik usuwania materiału. Pomocnym w ocenie procesu szlifowania jest również analiza obrazów mikroskopowych wiórów. Zdaniem oceniającego podjęcie tego typu problematyki w znaczący sposób wzmocniłoby opis procesu szlifowania nowymi wielogranulacyjnymi tarczami. Tym bardziej, że w rozdziale *Analiza stanu wiedzy* tego typu problematyka pojawiła się. Należy dodać, że badania pomiaru sił pojawiają się we wnioskach do dalszych badań w kontekście modelowania procesu szlifowania.
- Zakres pracy (str. 66) zawiera punkt: *zweryfikować doświadczalnie opracowane modele matematyczne*. W pracy Doktorant wyznaczył w ramach przeprowadzonego eksperymentu planowanego liczne równania regresji. Zdaniem oceniającego trudno weryfikować doświadczalnie równania, które powstały na podstawie przeprowadzonych doświadczeń.
- Zakres pracy zawiera również punkt: *opracować w ramach współpracy z firmą Norton Saint-Gobian nowego typu tarcz ściernych...*. Doktorant w pracy nie zawarł informacji o udziale w tych działaniach, a przecież takie informacje wzmocniłyby Jego dorobek praktyczny.
- Doktorant na podstawie obserwacji zdjęć mikroskopowych ocenia stan warstwy wierzchniej po szlifowaniu i stan ściernicy. Obserwacja jest procesem bardzo subiektywnym, często zależy od szczegółowości obrazu. Nasuwa się pytanie czy zastosowano do tej oceny jakieś kryteria?

W podsumowaniu pracy (rozdział 6) Doktorant zaprezentował najważniejsze osiągnięcia o charakterze użytkowym i poznawczym oraz ze wskazaniem do dalszych badań. W tym miejscu należy stwierdzić, że Doktorant zrealizował założone badania, osiągając

planowane cele naukowe, a zawartość pracy ściśle odpowiada jej tematowi. Zdaniem oceniającego we wnioskach dotyczących dalszych badań zabrakło problemów związanych z opisem procesu szlifowania od strony energetycznej. Gdyż dobierając warunki szlifowania, ze względu na obciążenia termiczne, wynikające z dążenia do uzyskania wysokiej wydajności procesu, najczęściej określa się energię właściwą szlifowania.

Autor pracy nie ustrzegł się błędów językowych, stylistycznych i edytorskich, które nie umniejszają w znaczący sposób dokonań Doktoranta np.:

- (25₉) „... ziaren azotku boru zawieszonych z spoiwie metalowym ...”
- (34¹⁰) „Jak ukazano na poniżej, różna rotacja ziarna ...”,
- (42⁶) „... plastycznego płynięcia Niektóre materiały ...”
- (44₁₂) „... oraz właściwości materiału [142-144] Uzyskane właściwości powierzchni ...”
- (58³) „... co powoduje poprawienie jakości powierzchni po obróbce ...”
- (77⁹) „... głębokości skrawani przyjętej w doświadczeniu ...”
- (82₂) „... którą zestawiono z drugim rodzaje ściernicy ...”
- (84₆) „Położenie względnego punktu „0” podczas procesu szlifowania, czyli moment ...”
- (95⁶) „Są one sytuowane wzdłuż struktury ...”
- (103⁵) „... obserwuje się lepszym wykończenie ...”
- (106₂) „... naRysunkach ...”
- Występowanie kropki na końcu podpisów pod rysunkami i w tytułach tabel.

Pomimo tych błędów należy podkreślić dużą staranność wykonania pracy.

Wniosek końcowy

W podsumowaniu niniejszej recenzji należy stwierdzić, że pomimo wykazanych uchybień rozprawa doktorska zawiera elementy wartościowe pod względem poznawczym i utylitarnym. Tematyka rozprawy doktorskiej jest aktualna i została dobrana trafnie i zasadnie pod względem merytorycznym. Doktorant wykazał się znaczną wiedzą w zakresie zagadnień prezentowanych w pracy. W związku z powyższym, oceniam pracę doktorską mgr inż. Adriana Kopytowskiego, jako spełniającą wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z obowiązującą Ustawą o stopniach i tytułach naukowych i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Tomasz Paczkowski