

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

Bydgoszcz, 22.11.2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej zatytułowanej:

Badanie wpływu cech elektrody roboczej i parametrów obróbki na właściwości warstwy wierzchniej po stopowaniu elektroiskrowym

Autor: **mgr inż. Krzysztof Łakomic**

Promotor: **dr hab. inż. Sławomir Spadło, prof. uczelni**

Promotor pomocniczy: **dr inż. Dorota Świercz-Oniszcuk**

Niniejsza recenzja opracowana została na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Warszawskiej, prof. dr. hab. inż. Tomasza Chmielewskiego, pismem z dnia 11.09.2023 r.

1. Charakterystyka pracy – ocena formalna

Recenzowana praca zawiera 174 stron w tym 167 tekstu zasadniczego, obejmujące 5 rozdziałów, spis treści, wykaz symboli, akronimów i definicji oraz zestawienie bibliografii składającej się z 117 pozycji literaturowych, do których Autor odwołuje się w dysertacji. W pracy zamieszczono 147 rysunków, 29 tabel, 11 wzorów w tym opracowane przez Autora równania regresji.

Problematyka rozprawy dotyczy zagadnień związanych z wpływem cech elektrody roboczej i parametrów obróbki stopowaniem elektroiskrowym na właściwości warstwy wierzchniej obrabianych powierzchni.

Technologia modyfikowania warstw wierzchnich powierzchni stopowaniem elektroiskrowym umożliwia tworzenie warstw o specyficznych strukturach o grubości rzędu kilkudziesięciu mikrometrów. Warstwy te charakteryzują się podwyższoną twardością

i odpornością na zużycie i mają zastosowanie do detali pracujących w warunkach o dużym obciążeniu termicznym i narażonych na zużycie erozyjne. Technologia ta posiada także wiele wad. Z tego względu pomimo licznych prac naukowych o charakterze teoretycznym i doświadczalnym, poświęconych zagadnieniom stopowania elektroiskrowego mało jest prac dotyczących kompleksowej analizy tej technologii.

Podjęcie się przez Autora kompleksowych badań wpływu cech elektrody roboczej i parametrów obróbki stopowaniem elektroiskrowym na właściwości warstwy wierzchniej obrabianych powierzchni jest uzasadnione w świetle dokonanych analiz i przytoczonych informacji. Należy podkreślić, że poszukiwanie metod poprawy właściwości warstwy wierzchniej, w której koncentrują się pęknięcia zmęczeniowe i inne formy zużycia we współpracujących elementach jest zawsze czynnikiem rozwoju procesów wytwórczych 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.

Rozprawa ma charakter doświadczalny, ponieważ główną jej wartością są wykonane kompleksowe badania procesu stopowania powierzchni, co opisane zostało w rozdziale 4.

Rozdział 3, poprzedzający część badawczą pracy, zawiera cel i zakres pracy. Zakres pracy Autor zawarł w sześciu punktach, z których zdaniem oceniającego najważniejsze dotyczą:

- określenie możliwości zastosowania stopowania elektroiskrowego powierzchni kształtowych elektrodami monolitycznymi wykonanymi z materiałów stopowych jako potencjalnego sposobu ulepszania powierzchni,
- określenie zakresów wartości parametrów elektrycznych przy których zachodzi efektywny transport masy,
- ocena wpływu ośrodka (ciecz, gaz) na stan warstwy wierzchniej,
- opracowanie podstaw racjonalnego wyboru sposobu stopowania elektroiskrowego i jego parametrów w zależności od celu i wymaganych efektów obróbki.

Wprowadzenie w temat pracy Doktorant zawarł we wstępie wskazując znaczenie obróbki elektroerozyjnej i stopowania iskrowego w technologii maszyn oraz podobieństwa łączące te technologie. Następnie w rozdziale pierwszym został szeroko scharakteryzowany proces obróbki elektroerozyjnej, w której zachodzą analogiczne zjawiska jak przy stopowaniu elektroiskrowym. Opisane zagadnienia głównie obejmują 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 podstawy fizyczne tej obróbki, zaczynając od zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej, poprzez opis parametrów i ich wpływu na przyjęte w cytowanej literaturze wskaźniki technologiczne i użytkowe. Dodatkowo w tej części pracy opisał i scharakteryzował generatory prądu stosowane w tym procesie. Charakterystyka metod stopowania elektroiskrowego została opisana w rozdziale drugim. Metody stopowania elektroiskrowego Doktorant opisał dość szeroko uwzględniając różnego rodzaju stosowane

elektrody oraz uzyskane efekty tego procesu. Rozdział ten jest jednocześnie swego rodzaju analizą stanu wiedzy dotyczącej procesu stopowania. Podsumowanie tej analizy Doktorant zawarł w podrozdziałach podsumowujących opisywane poszczególne metody stopowania. Rozdział czwarty dotyczy badań doświadczalnych. Jest to najbardziej obszerny rozdział pracy, w którym opisano metodologię i kompleksowe badania doświadczalne wspomnianego wcześniej procesu stopowania elektroiskrowego. Rozdział ten zawiera szczegółowy opis stanowisk badawczych oraz aparatury pomiarowej. W kolejnej części tego rozdziału Doktorant opisał zakres oraz warunki badań doświadczalnych oraz przedstawił wyniki badań w postaci licznych wykresów w tym przestrzennych utworzonych na podstawie opracowanych równań regresji oraz współczynniki korelacji wielkości badanych do wielkości wejściowych. Każdą sekwencję badań doktorant kończy podsumowaniem. Wnioski o charakterze użytkowym i poznawczym zawarto w rozdziale piątym.

W podsumowaniu tej części opinii stwierdzam, że praca obejmuje zagadnienia technologiczne procesu stopowania elektroiskrowego z wykorzystaniem różnych elektrod roboczych i ich wpływu na parametry i efekty tego procesu, 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. Jest to zatem układ typowy dla rozpraw doktorskich przedstawianych do obrony w naukach inżynieryjno-technicznych, których głównym przedmiotem są badania eksperymentalne.

2. Ocena merytoryczna pracy

Podjęta w rozprawie tematyka badawcza obejmuje kompleksowe badania dotyczące wpływu cech elektrod roboczych i parametrów obróbki na właściwości modyfikowanej warstwy wierzchniej.

Doktorant, po przeanalizowaniu dostępnej literatury, zidentyfikował określone luki poznawcze i trendy w badaniach, a następnie sformułował cele i zakres pracy. Ogółem podjętą tematykę oceniam jako aktualną i ważną. Opracowanie zawiera elementy nowości głównie w sferze poznawczej. Należy dodać, że problematyka pracy jest ważna i wciąż aktualna, choć została zauważona już ponad dekadę temu, trudno zatem uznać ją za całkowicie innowacyjną i przełomową. Biorąc pod uwagę wielowątkowość badań Doktorant zdefiniował sześć celów pracy, które obejmują zastosowanie różnego rodzaju elektrod roboczych, określenie zakresów wartości parametrów procesu, ocenę wpływu ośrodka na proces, możliwości zastosowania zasilaczy stosowanych w obrabiarkach EDM oraz opracowanie podstaw racjonalnego wyboru sposobu stopowania elektroiskrowego.

Uważam, że zarówno podjęta szczegółowa tematyka, jak i zdefiniowane przez Doktoranta cele pracy spełniają znamiona pracy naukowej na poziomie pozwalającym mówić

o badaniach na potrzeby rozprawy doktorskiej. W pracy brakuje jasnego zdefiniowania nierozwiązanych problemów naukowych (są tylko cele i zakres pracy) – ale można się ich domyślić przez domniemanie, nie jest to zatem duże uchybienie.

Kształtowanie warstwy wierzchniej pracujących powierzchni obejmuje całokształt działań naukowych i technicznych, mających na celu konstruowanie, wytwarzanie, badanie i stosowanie warstw powierzchniowych o innych, lepszych niż rdzeń lub podłoże właściwościach, głównie antykorozyjnych, antyściernych i antyzmęczeniowych. Rozwój tych działań pociąga za sobą powstanie nowych urządzeń, a co za tym idzie technologii i często bardzo skomplikowanej aparatury.

Z powyższymi problemami wiąże się bezpośrednio opiniowana rozprawa.

Z uwagi na powyższe uważam, że jest uzasadniony wybór tematyki opiniowanej rozprawy nt. "Badanie wpływu cech elektrody roboczej i parametrów obróbki na właściwości warstwy wierzchniej po stopowaniu elektroiskrowym".

Przystępując do eksperymentu, trzeba mieć wiedzę zarówno teoretyczną jak i z zakresu technik i metod badawczych. Analiza dostępnej literatury została w mojej opinii przeprowadzona poprawnie, na poziomie właściwym dla rozpraw doktorskich o podobnej tematyce. Wybrana i zacytowana literatura jest w większości przypadków aktualna i poprawnie dobrana do zagadnienia. Analiza literatury mieści się w dwóch pierwszych rozdziałach i została przeprowadzona dość wnikliwie, z opisem przeprowadzonych przez różnych autorów eksperymentów i ich wyników. Widać tutaj analityczne podejście Autora do tematu, a przeprowadzony przegląd literatury spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych. Przegląd literatury zawiera 117 pozycji z czego około połowa publikacji jest z ostatniego dziesięciolecia w tym 8 publikacji jest współautorskich związanych z tematyką rozprawy.

Zdaniem oceniającego, Doktorant niepotrzebnie przytacza niektóre źródła, a pewne opisy literaturowe nie mają znaczenia i nic nie wnoszą w kontekście przeprowadzonych eksperymentów i ich wyników. Do tej „nadmiarowej” i nie do końca potrzebnej części rozprawy zaliczyłbym choćby informacje encyklopedyczne dotyczące podstaw fizycznych procesów w obróbce elektroerozyjnej (rozdział 1.2), przegląd obrabiarek elektroerozyjnych czy podstawy budowy obrabiarek elektroerozyjnych (rozdziały 1.3 i 1.4). Te części nie zajmują jednak zbyt dużej części rozprawy, zatem nie jest to duży mankament.

Druga uwaga krytyczna to brak klasycznego podsumowania analizy literatury w sposób krytyczny oraz sformułowania przesłanek do podjętych w rozprawie badań. Autor częściowo wywiązuje się z tego obowiązku w dwóch pierwszych rozdziałach, ale opis ten jest rozproszony i nie do końca bezpośrednio uzasadnia podjętego przez Autora tematu pracy.

Uwagi krytyczne nie wpływają w znaczącym stopniu na ocenę tej części rozprawy – została ona przeprowadzona w sposób solidny, wnikliwy, analityczny i udowadnia posiadanie przez Autora odpowiednich umiejętności, wymaganych od naukowców ze stopniem naukowym doktora, o który ubiega się Autor pracy.

W pracy nie sformułowano bezpośrednio problemów badawczych. Wynikają one pośrednio z treści analizy literatury oraz sformułowanych celów. Co do celów i zakresu pracy – są one sformułowane generalnie poprawnie, aczkolwiek brakuje podziału na cel główny i cele szczegółowe. W obecnej formie jest to raczej zbiór równorzędnych celów, co nie do końca powinno mieć miejsce (autor rozprawy doktorskiej powinien sformułować jeden cel główny i dążyć do jego realizacji). Niemniej jednak, pomimo pewnych niejasności i braków, po przeczytaniu rozprawy dość klarownie można wywnioskować jakie problemy zostały w niej podjęte (i rozwiązane) oraz jakie cele miał Doktorant podczas realizacji badań. Zatem należy tutaj – podobnie jak w innych aspektach pracy – przyjąć spełnienie wymagań stawianych w tym zakresie rozprawom doktorskim.

Sformułowane w rozdziale trzecim cele 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. Zdaniem oceniającego badania przeprowadzono z zachowaniem należytej staranności i rzetelności. Można zatem uznać, że spełniona jest zwyczajowa przesłanka warunkująca przyznanie stopnia doktora nauk technicznych, tj. samodzielne zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentów badawczych, a następnie interpretacja ich wyników. Dodatkowo, wyniki pracy zostały częściowo przedstawione w czasopiśmie posiadającym współczynnik wpływu oraz wydawnictwach konferencyjnych, gdzie w niektórych z tych publikacji Doktorant figuruje jako pierwszy autor. To potwierdza znaczenie naukowe tych wyników oraz ich rzetelność.

Uwagi do tej części pracy dotyczą, w niektórych przypadkach, braku krytycznej i wnikliwej interpretacji przyczyn zaobserwowanych zjawisk. W przypadkach tych Doktorant ogranicza się wyłącznie do ich przedstawienia i opisu. Obserwacje są trafne i zgodne z wynikami badań – brakuje natomiast próby wyjaśnienia zjawisk które uzewnętrzniają się w wynikach. Przykładowo, w badaniach efektów pojedynczych wyładowań w warunkach stopowania elektrodą pręcikową drgającą Doktorant pisze, że „objętości dolin nierówności do objętości wierzchołków (wzniesień) nierówności, uzyskanych dla typowych warunków obróbki elektrodą pręcikową, stanowią średnio około 15 do 20% objętości wzniesień.” Po czym Doktorant nie podjął próby zinterpretowania tych obserwacji.

Zdaniem oceniającego, praca byłaby dużo bardziej wartościowa gdyby wkład Doktoranta w dyskusję wniosków był bardziej kreatywny. Należy jednak podkreślić szeroki zakres pojętych badań, które już w samej nazwie „*kompleksowe badania procesu stopowania*” sugerują duży ich zakres, a więc dużą pracochłonność i czasochłonność.

W wyniku badań otrzymano wpływ cech elektrod roboczych (pręcikowej, szczotkowej, monolitycznej) i parametrów obróbki na stan warstwy wierzchniej (struktura geometryczna, skład, mikrotwardość, masa, grubość naniesionej warstwy) po stopowaniu. Poszczególne sekwencje badań Autor podsumowuje w postaci opisu uzyskanych wyników oraz prezentuje je na licznych wykresach.

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

Uważam, że rozdział czwarty, a w szczególności rozdziały 4.3.3, 4.4.2, 4.5.3, 4.5.4, 4.5.5 stanowią najważniejszą część pracy i z nimi wiąże się oryginalny wkład mgr. inż. Krzysztofa Łakomca w rozwój technologii stopowania elektroiskrowego. Podsumowując do elementów nowości naukowej stanowiących oryginalny dorobek Doktoranta zaliczam:

- Opracowanie równań regresji i analiza uzyskanych wyników badań przyrostu masy próbki w funkcji wartości napięcia dla procesu stopowania elektrodą pręcikową.
- Opracowanie równań regresji i analiza uzyskanych wyników badań dotyczących korelacji zmiany masy próbek z natężeniem prądu i czasem trwania impulsu dla procesu stopowania elektrodą monolityczną.
- Analizę stanu warstwy wierzchniej po stopowaniu elektrodami monolitycznymi (X10CrNi18-8, wolframowa) dotyczącymi grubości i składu chemicznego.

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

- Brak przeprowadzenia badań wstępnych, które pozwoliłyby precyzyjnie dobrać zmienność parametrów niezależnych w badaniach a jednocześnie ich poziom istotności. Doktorant w badaniach przyjął parametry niezależne (wejściowe) oraz ich zakres zmienności (Tabela 10, 139⁸).
- Brak na wybranych fotografiach mikrostruktury naniesionej skali (np. rys. 4.83 ÷ 4.118). Utrudnia to oceniającemu ocenę takiej fotografii. O wartościach wymiarów widocznych elementów można dowiedzieć się jedynie z opisu.
- W badaniach efektów stopowania elektrodami monolitycznymi Doktorant pisze: „Cechą podstawową, na którą w niniejszych badaniach położono szczególny nacisk był wpływ parametrów obróbki na jej wydajność, charakteryzowaną przez grubość warstwy białej - G_{wb} ” (142₁₇). Zdaniem oceniającego można tutaj mówić o rozkładzie grubości warstwy białej, gdyż jest ona zmienna. Należałoby tutaj zaproponować jakiś parametr uwzględniający zmienny rozkład na przyjętej długości odcinka pomiarowego.
- Zdaniem oceniającego na wykresie 4.41 w sposób nieuzasadniony Doktorant połączył punkty liniami prostymi. Przedstawione na wykresie wartości łączy funkcja wykładnicza zgodnie z równaniem 4.5.
- W badaniach eksperymentalnych stopowania elektrodą pręcikową drgającą Doktorant stwierdza: „Dodatkowym czynnikiem kształtującym SGP podczas stopowania z zastosowaniem elektrody drgającej jest jej oddziaływanie mechaniczne na stopowaną powierzchnię” (107₁). Zdaniem oceniającego powyższe stwierdzenie jest intuicyjne. Trudno w pracy doszukać się informacji, które mogłyby uzasadnić takie stwierdzenie. Dodatkowo o parametrach i charakterze drgań można jedynie wnioskować z opisu zasady działania głowicy roboczej (85₂).

W podsumowaniu pracy (rozdział 5) Doktorant zaprezentował najważniejsze osiągnięcia o charakterze utylitarnym i poznawczym. W tym miejscu należy stwierdzić, że Doktorant zrealizował założone badania, osiągając planowane cele naukowe, a zawartość pracy odpowiada jej tematowi. Wnioski są ogólnie poprawnie sformowane. Uwagi krytyczne dotyczą wniosku 4. Jest on zbyt ogólny i w sumie nie wynika z badań. Użycie stwierdzeń „optymalnych wyników” (wniosek 4) i „optymalne parametry” (wniosek 13) nie jest poparte przyjęciem parametrów w badaniach względem których zostały one zoptymalizowane. Zdaniem oceniającego w podsumowaniu można było uwzględnić wnioski dotyczące dalszych badań, a w obszarze tych wniosków problemów związanych z dokładnością obróbki i aplikacyjnością badanych procesów.

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

- (31¹) „W tabela 1 przedstawiono typowe wartości ...”
- (32₃) „Przyczyną tego stanu jest zbyt mała szerokość szczeliny międzyelektrodowej”. Poprawniej byłoby wysokość lub grubość szczeliny.
- (135₆) „... poddano obserwacji powierzchni obrabianą. Na rysunkach ... przedstawiono obrazy topografii ...”. Powierzchnia musiała być już obrobiona aby możliwe było wykonanie cytowanych obrazów topografii.
- Brak odwołań do tabel 16 ÷ 19.

Pomimo tych drobnych błędów należy podkreślić bardzo 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. Krzysztofa Łakomca, 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.

