

dr hab. inż. Sławomir Spadło, prof. PŚk
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Katedra Metaloznawstwa i Technologii Materiałowych
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach
e-mail: sspadlo@tu.kielce.pl

Kielce, dn. 19.06.2023 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała Nowickiego
pt. „*Wpływ wielkości ziarna elektrod grafitowych na wskaźniki technologiczne
i stan warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej*”

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

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Warszawskiej, Pana prof. dr hab. inż. Tomasza Chmielewskiego z dnia 19.04.2023 r. sygn. MT.521.2.2023

1. Charakterystyka podjętej tematyki rozprawy doktorskiej

Idea obróbki elementów maszyn z wykorzystaniem niekonwencjonalnych technik wytwarzania, w tym obróbki elektroerozyjnej znana jest od lat, dotyczy ona bowiem kształtowania części składowych oprzyrządowania technologicznego, a w ostatnich latach wykorzystywana jest również jako technologia produkcyjna części maszyn o złożonej makrogeometrii. Zagadnienia produkcji skomplikowanych części nabierają szczególnego znaczenia w sytuacjach, w których stawiane są bardzo wysokie wymagania co do materiałów konstrukcyjnych jak i jakości produkowanych wyrobów np. w przemyśle kosmicznym, lotniczym czy militarnym.

Z taką sytuacją mamy do czynienia między innymi w przypadku maszyn wirnikowych w przemyśle lotniczym. Zagadnienia dotyczące obróbki elementów cienkościennych wykonanych z materiałów trudnoobrabialnych, stają się szczególnie istotne w procesach produkcyjnych elementów takich jak stateczniki, elementy wykonawcze układów sterowania amunicji raketowej zaawansowanych komponentów silników przepływowych, w których zapewnienie niezawodności

procesów produkcyjnych w szczególności w zadaniach, w których wymagania dotyczące dokładności oraz powtarzalności uzyskiwanych wymiarów postawione są na bardzo wysokim poziomie stają się wyzwaniem naukowym.

Zagadnienia badawcze związane z rozwiązaniem tak postawionych zadań nigdy nie były łatwe, wymagały w procesach badawczych uwzględnienia wielu czynników związanych z badanym sposobem obróbki. Badania obróbki elektroerozyjnej, w szerszym kontekście, dotyczą zjawisk fizycznych zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej, warunków jej przepływania, badania wpływu parametrów układów zasilania na efektywność procesu elektrodrążenia a także konstrukcji oraz wymagań materiałowych dotyczących elektrod roboczych.

Z uwagi na stawiane coraz wyższe wymagania dotyczące dokładności wymiarowej, stanu technologicznej warstwy wierzchniej, czynników ekonomicznych związanych z wytwarzaniem elektrod do obróbki elektroerozyjnej uważam, że doktorant, w sposób właściwych określił obszar tematyki badawczej.

W tym kontekście uważam, że praca mgr inż. Rafała Nowickiego dotycząca badań elektrod grafitowych wpisuje się w ogólnoswiatowe kierunki badań, wnosząc wymierne korzyści poznawcze i użytkowe. Dlatego też uważam, że podjęty przez Autora pracy temat a także zakres pracy należy uznać za uzasadniony i bardzo aktualny.

2. Charakterystyka zawartości pracy

Recenzowana rozprawa doktorska, ma objętość 196 stron. Podzielona jest na 10 rozdziałów stanowiących zasadniczą część oraz spisu literatury. Zawiera 25 zestawień w formie tabelarycznej i 142 rysunki. Ponadto wykaz oznaczeń i skrótów stosowanych w pracy oraz zestawienie bibliografii (251 pozycji). Praca zawiera streszczenie w języku polskim i angielskim.

Rozdział 1. stanowi wstęp do pracy, Doktorant scharakteryzował w nim zagadnienia dotyczące obróbki materiałów trudnoobrabialnych, ze szczególnym uwzględnieniem procesu obróbki elektroerozyjnej (EDM) w procesach wytwarzania.

Rozdział 2. dotyczy przeglądu i analizy dostępnej literatury. Rozdział został podzielony, w sposób logiczny, mający na celu scharakteryzowanie głównych obszarów dotyczących podjętej tematyki badawczej obejmujących zagadnienia związane z podstawami fizycznymi obróbki

elektroerozyjnej, charakterystykami procesu w zakresie dotyczącym erozji elektrod roboczych, funkcji dielektryka w procesie obróbki, oraz zgaień materiałowych dotyczących elektrod z uwzględnieniem grafitu jako materiału na ich wykonanie.

W części końcowej przeglądu bibliograficznego Doktorant dokonał przeglądu literatury w obszarze zagadnień dotyczących właściwości warstwy wierzchniej. Przeprowadzona analiza dotyczyła konstytuowania cech struktury geometrycznej powierzchni, grubości warstwy zmienionej oraz wad powierzchniowych towarzyszących obróbce elektroerozyjnej. Pewnym mankamentem przeglądu literatury, jest jednoczesne wyszczególnienie wielu pozycji literaturowych (np. na str. 65 występuje jednoczesne odwołanie do 12 pozycji), bez przeprowadzenia ich szczegółowej analizy. W opinii oceniającego wskazane byłoby, odniesienie się do treści zawartych w przytoczonych odwołaniach. Ważnym elementem przeprowadzonej analizy jest ocena wpływu warunków obróbki elektroerozyjnej wraz z towarzyszącymi jej oddziaływaniami cieplnymi na zmiany mikrostruktury metalograficznej badanych materiałów. Autor dokonał również analizy wpływu parametrów obróbki, rodzaju ośrodka międzyelektrodowego, kinematyki elektrody roboczej oraz materiału elektrody roboczej na stan warstwy wierzchniej. Autor scharakteryzował wady powierzchniowe powstające w procesie obróbki elektroerozyjnej mikropęknięć, wzbogacenia składu chemicznego warstw przypowierzchniowych w wyniku oddziaływania produktów rozkładu węglowodorowego dielektryka, lub odwęglenia warstwy w przypadku stosowania jako cieczy roboczej wody dejonizowanej.

Doktorant w szerokim zakresie scharakteryzował morfologię warstwy wierzchniej materiału po obróbce elektroerozyjnej, nie odniósł się jednak do kwestii kinetyki poszczególnych przemian materiałowych np. w zakresie dotyczącym przemiany martenzytycznej, kinetyki rozrostu ziaren.

W rozdziale 3. Autor dokonuje podsumowania przeglądu literatury i definiuje obszar badawczy dotyczący podjętej pracy, trafnie określił cel i zakres pracy.

Na uwagę zasługuje rozbudowany zakres pracy obejmujący szeroko zakrojony program badawczy, w którym uwzględniono szereg istotnych, z punktu widzenia obróbki elektroerozyjnej czynników. W rozdziale tym szczegółowo charakteryzuje przedmiot badań, scharakteryzował właściwości grafitu jako materiału do wytwarzania elektrod roboczych.

Rozdział 4 – Warunki i metodyka badań. Doktorant, w sposób szczegółowy scharakteryzował aparaturę badawczą stosowaną w trakcie badań, ze szczególnym

uwzględnianiem charakterystyk elektrodrażarki, oprzyrządowania badawczego oraz warunków rejestracji przebiegów napięcia i prądu zasilającego. Określił czynniki wejściowe, przedstawił metodykę badań, oraz sposób aproksymacji i oceny istotności uzyskanych wyników.

Rozdział 5 – Badanie wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych na wskaźniki technologiczne. Treść rozdziału dotyczy oceny podstawowych parametrów technologicznych procesu elektrodrażenia: wydajności obróbki oraz względnego zużycia elektrody roboczej. Autor przedstawił wyniki badań doświadczalnych procesu elektroerozji z wykorzystaniem jako materiału elektrod grafitu o różnej wielkości ziarna. Badania przeprowadzono na podstawie planu eksperymentalnego trójczynnika, pięciopoziomowego. Jako czynniki zmienne w badaniach przyjęto natężenia prądu wyładowania, czas wyładowania oraz przerwy. Badania przeprowadzono dla polaryzacji prostej i odwrotnej elektrod.

W dalszej części rozdziału Doktorant przedstawił opracowanie wyników badań w postaci równań regresji wiążących parametry wejściowe procesu z wydajnością obróbki oraz względnym zużyciem elektrody roboczej. Dokonał oceny adekwatności opracowanych równań regresji. Wyniki badań zostały przedstawione w formie wykresów. W rozdziale przedstawiono w formie wykresów przykładowe przebiegi zmienności natężenia prądu elektrycznego oraz napięcia w procesie obróbki. Rozdział zawiera analizę i podsumowanie wyników badań.

Rozdział 6. Badanie wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych i parametrów obróbki na chropowatość powierzchni po EDM. Autor scharakteryzował cechy struktury geometrycznej powierzchni po obróbce elektroerozyjnej, wytypował najistotniejsze parametry SGP wpływające na cechy eksploatacyjne współpracujących elementów maszyn.

Badania przeprowadzono na podstawie planu eksperymentalnego trójczynnika, pięciopoziomowego, w którym przyjęto jako czynniki zmienne natężenie prądu wyładowania, czas wyładowania oraz przerwy. Badania przeprowadzono dla polaryzacji prostej i odwrotnej elektrod. Jako czynniki wyjściowe przyjęto wcześniej wytypowane parametry struktury geometrycznej powierzchni (S_a , S_z , S_t , S_{ds} , S_{fd} , S_{dr}). Zilustrował wyniki badań w formie wykresów przedstawiających zależność wartości badanych parametrów struktury geometrycznej powierzchni w funkcji parametrami obróbki.

W dalszej części rozdziału Doktorant dokonał obróbki statystycznej wyników badań według standardowych procedur. W końcowej części rozdziału Autor przeprowadza analizę dotyczącą konstytuowania struktury geometrycznej powierzchni w zależności od energii wyładowania, przedstawiając np. na rys. 6.29 przykładowe obrazy topografii powierzchni

w zależności od jej wartości. Wartościowym elementem opracowania byłoby wskazanie sposobu w jaki określono wartość energii wyładowania.

Rozdział 7. Badanie składu chemicznego powierzchni wybranych próbek po obróbce EDM. W rozdziale tym, o relatywnie małej objętości pięciu stron, zawarte są wyniki badań warstwy wierzchniej materiałów obrabianych elektrodami grafitowymi dla polaryzacji prostej i odwrotnej. Autor wskazuje, że warstwa powierzchniowa materiału obrabianego zawiera znaczne ilości węgla pochodzące z elektrod roboczych oraz pirolizy dielektryka węglowodorowego.

Rozdział 8. Udział nośny powierzchni po obróbce EDM

W rozdziale tym Autor scharakteryzował, na podstawie charakterystyk udziału nośnego powierzchni, właściwości tribologiczne technologicznej warstwy wierzchniej podając stosowane parametry.

Rozdział 9. Badania wpływu wielkości ziaren elektrod grafitowych i parametrów elektrycznych na strukturę metalograficzną powierzchni po EDM z polaryzacją prostą. W tytule rozdziału powinno wystąpić zamiast „...strukturę metalograficzną powierzchni...” określenie np. „...strukturę metalograficzną warstwy zmienionej...”. Kolejnym elementem wymagającym wyjaśnienia jest użycie (na str. 156) określenia rekrytalizacja jako procesu dotyczącego przemian fazowych zachodzących począwszy od stanu ciekłego do fazy stałej. W większości przypadków procesy rekrytalizacji analizowane są jako przemiany zachodzące w stanie stałym. W opinii oceniającego, wskazane byłoby odniesienie się do kwestii zachodzących w warstwie wierzchniej przemian nie tylko w kontekście szybkości chłodzenia, ale również składu chemicznego obrabianego materiału.

W dalszej części rozdziału Doktorant charakteryzuje wady powierzchniowe powstałe w wyniku oddziaływań cieplnych towarzyszących obróbce elektroerozyjnej oraz określa związki ilościowe pomiędzy grubością warstwy przetopionej a parametrami obróbki.

Rozdział 10. Podsumowanie, wnioski zawiera najistotniejsze wnioski z przeprowadzonych badań. Autor dokonał podsumowania przeprowadzonych prac poprzez scharakteryzowanie wpływu cech materiałowych grafitu (wielkość ziarna, przewodność elektryczna, gęstość pozorna) oraz skutków jego zastosowania, jako materiału na elektrody robocze, związanych z procesami kontaminacji szczeliny międzyelektrodowej produktami ich erozji. Kolejna grupa wniosków

dotyczy wpływu warunków obróbki (nastaw wartości prądu, czasu impulsu czasu przerwy oraz biegunowości elektrod) na charakterystyki technologicznych procesu EDM.

W podsumowaniu Autor przedstawia trafną konkluzję dotyczącą możliwości zastosowania opracowanych równań regresji, do opracowania wytycznych dotyczących doboru parametrów obróbki w celu uzyskania założonych wskaźników technologicznych procesu obróbki elektroerozyjnej.

Doktorant trafnie dostrzega, że mankamentem procesu obróbki elektroerozyjnej, związanym z właściwościami zastosowanego w badaniach materiału elektrodowego jest jego relatywnie niska odporność erozyjna. W zawiązku z powyższym, przewiduje skoncentrowanie dalszych prac badawczych na warunkach przepłukiwania szczeliny międzyelektrodowej mających na celu usuwanie produktów erozji oraz ziaren grafitu stanowiących utrudnienie w stabilnym przebiegu procesu elektroerozji. Zaproponowane zostały między innymi prace badawcze związane z wprowadzeniem drgań ultradźwiękowych elektrody roboczej oraz warunków podawania dielektryka do szczeliny międzyelektrodowej.

Kończącą pozycję rozprawy stanowi bibliografia.

3. Uwagi szczegółowe dotyczące pracy

Praca została przygotowana starannie pod względem redakcyjnym i językowym oraz graficznym, jednakże autor nie ustrzegł się pewnych nieścisłości, usterek o charakterze edycyjnym lub stylistycznym, a w szczególności:

1. Autor dysertacji niekiedy cytuje dużą liczbę pozycji literaturowych bez szczegółowego odniesienia się do treści poruszanych tam zagadnień. Pewne zmiany redakcyjne w tym zakresie przyczyniły by się do poprawy jakości odbioru tej pracy.
2. Autor wielokrotnie stosuje różne oznaczenia stali począwszy od drobnych usterek str. 36 dotyczących oznaczenia X5CrNi 1810 powinno być X5CrNi 18-10, poprzez podawanie oznaczeń gatunków stali według różnych norm (przykłady: stal D2, stal H13, XW42, AISI 304

Str. 13 Autor używa określenia „napięcie otwarte” podczas gdy właściwym określeniem jest „napięcie elektryczne otwartego źródła prądu”.

Str. 43 jest „...*najbardziej wpływowym czynnikiem jest....*” powinno być np.– „...*czynnikiem najbardziej wpływającym jest....*”

Str. 45 „*Elektrody miedziane uzyskały mniejszą wydajność ...*” powinno być np.– „*W wyniku zastosowania elektrod miedzianych uzyskano mniejszą wydajność ...*”

Str. 49 użyte zostało określenie *stop węglika wolframu z kobaltem (WC-Co)*, w polskim nazewnictwie wyszczególniony materiał jest spiekami (węgiel spiekany).

Str. 52, 57 użyto nieprawidłowego określenia *cząsteczka* zamiast *np. cząstka*.

Str. 68 użyte zostało określenie „... *na drodze kondukcji*...”, mając na myśli jeden ze sposobów wymiany ciepła powinno być użyte określenie „... *w wyniku przewodzenia* ...”.

Str. 73 jest „...*miedzianych na grafitowe*...” powinno „...*miedzianych grafitowymi*...”.

Str. 75 użyto nieprawidłowego określenia „*Struktura metalograficzna powierzchni*”

Str. 91 użyto nieprawidłowego sformułowania „...*poprzez spadek napięcia*...” powinno być „...*poprzez pomiar spadku napięcia*...”

Str. 152-155 W podpisach pod rysunkami 8.2-8.9 użyto niewłaściwego określenia zamiast „*profilograf*” powinno być użyte określenie „*profilogram*”.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska pt. „*Wpływ wielkości ziarna elektrod grafitowych na wskaźniki technologiczne i stan warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej*” została zrealizowana na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Warszawskiej i została napisana pod kierownictwem naukowym Pana dr hab. inż. Rafała Świercza prof. uczelni.

Tytuł pracy w pełni odzwierciedla treści zawarte w przedmiotowej dysertacji i został sformułowany poprawnie.

W oparciu o analizę i wyniki badań zawartych w literaturze Doktorant trafnie sformułował przedmiot badań, cel i zakres pracy.

Dla osiągnięcia celów stanowiących przedmiot realizowanej pracy Doktorant zrealizował i udokumentował bardzo szeroki zakres badań doświadczalnych.

Rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Nowickiego ma charakter w głównej mierze eksperymentalny, dotyczący badań procesu obróbki elektroerozyjnej (EDM) z zastosowaniem elektrod roboczych grafitowych. Stanowi ona oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego.

Oceniając całościowo rozprawę należy stwierdzić, że układ pracy i wybór narzędzi badawczych oraz metodyki prowadzenia badań uważam za poprawny. Uzyskane wyniki stanowiły dane do przeprowadzonych przez Autora analiz dotyczących możliwości zastosowania grafitu jako materiału na elektrody robocze w procesie obróbki elektroerozyjnej. Merytorycznie praca nie

budzi zastrzeżeń. Opracowane wyników prac eksperymentalnych w postaci równań regresji cechuje jakościowa i ilościowa zbieżność z wynikami pomiarów, co świadczy o poprawności opracowanych modeli.

Temat rozprawy jest aktualny, a zawarty w niej materiał badawczy bogaty. Doktorant wykazał się umiejętnością planowania i przeprowadzenia badań eksperymentalnych a także opracowania i merytorycznej, wnikliwej oceny wyników.

Na uwagę zasługuje fakt starannego przygotowania do badań eksperymentalnych, które obejmowały szczegółową analizę literatury, badania wstępne dotyczące określenia właściwości grafitu jako materiału na elektrody robocze oraz racjonalne uzasadnienie wyboru materiału stanowiącego przedmiot badań - Hastelloy C22. W wyniku badań wstępnych Doktorant określił najistotniejsze parametry obróbki EDM oraz przedziały ich zmienności.

Na podstawie analizy wyników badań wstępnych Doktorant opracował autorskie koncepcje badawcze przedstawione w zasadniczej części opracowania

Uważam, że uwagi zawarte w recenzji mogą być przedmiotem analiz w dalszej działalności badawczej i publikacyjnej Doktoranta. Podkreślam, że część uwag ma charakter pytań i sugestii do wykorzystania w przyszłości. Ponadto stwierdzam, że postawiony cel i zakres pracy badawczej zostały w pełni osiągnięte.

Wśród wielu publikacji dotyczących zagadnień obróbek niekonwencjonalnych, mgr inż. Rafał Nowicki potrafił znaleźć istotny, z punktu widzenia naukowego i użytecznego, problem badawczy, który rozwiązał samodzielnie, przyczyniając się do rozwoju dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

Do oryginalnych osiągnięć pracy zaliczam:

1. Prawidłowo zaplanowane i przeprowadzone obszerne, wielokierunkowe badania eksperymentalne dotyczące obróbki elektroerozyjnej.
2. Wykazanie korzyści wynikających z zastosowania grafitu jako materiału na elektrody robocze w obróbce EDM.
3. Wieloaspektową ocenę stanu technologicznej warstwy wierzchniej w funkcji warunków obróbki, w tym wielkości ziaren materiału elektrodowego oraz biegunowości elektrod.
4. Wysoki potencjał wdrożeniowy rezultatów przeprowadzonych badań naukowych w nowoczesnych gałęziach przemysłu.

5. Ocena końcowa

Przedstawione uwagi krytyczne nie podważają istotnej treści merytorycznej dysertacji ani nie umniejszają osiągnięć Doktoranta, który udowodnił, że posiada dużą wiedzę z zakresu zagadnień dotyczących niekonwencjonalnych technik wytwarzania, a w szczególności w zakresie dotyczącym obróbki elektroerozyjnej.

Stwierdzam, że treści oraz wyniki badań i sposób ich prezentacji poszerzają wiedzę w zakresie dotyczącym obróbki elektroerozyjnej, a tematyka rozprawy wpisuje się w nowoczesne kierunki badań w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.

Należy podkreślić, iż zakres przeprowadzonych badań jest obszerny, a prezentacja wyników przejrzysta. Świadczy to o tym, że mgr inż. Rafał Nowicki posiada umiejętność samodzielnego planowania i realizacji badań naukowych.

6. Wniosek końcowy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska **mgr inż. Rafała Nowickiego** jest zrealizowana w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna. Wymiernym efektem pracy naukowej, stanowiącej zasadniczą część opracowania jest wieloaspektowa ocena możliwości zastosowania grafitu na elektrody robocze w procesie obróbki elektroerozyjnej.

Wobec powyższego stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „**Wpływ wielkości ziarna elektrod grafitowych na wskaźniki technologiczne i stan warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej**” spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim. Stosownie do przepisów ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z dnia 30 sierpnia 2018 r. poz. 1668 z późniejszymi zmianami), upoważnia mnie do przedłożenia Radzie Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej wniosku o dopuszczenie mgr inż. Rafała Nowickiego do publicznej obrony.

