Prof. dr hab. inż. Andrzej Kawalec

Katedra Technik Wytwarzania i Automatyzacji
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska
al. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 20.11.2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

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

Autor rozprawy: **mgr inż. Krzysztof Łakomiec**

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

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

Recenzję wykonano na podstawie pisma MT.521.14.2023 z dnia 11.09.2023 r. Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Warszawskiej, Pana prof. dr. hab. inż. Tomasza Chmielewskiego.

1. Ocena doboru tematu rozprawy doktorskiej.

Tematyka rozprawy obejmuje ważne zagadnienia dotyczące obróbki wykończeniowej przedmiotów z użyciem obróbki elektroerozyjnej (Electrical Discharge Machining – EDM), oraz modyfikacji właściwości ich warstwy wierzchniej np. poprzez wprowadzenie do niej pierwiastków chemicznych, wpływających na ich właściwości użytkowe. Jej rola we współczesnej technologii ma istotne znaczenie ze względu na możliwość kształtowania wyrobów i modyfikacji ich warstwy wierzchniej, szczególnie w przypadku materiałów trudnoskrawalnych, stosowanych m.in. w nowoczesnych środkach transportu lotniczego i kosmicznego. Materiały te, m.in. ich właściwości fizyczne, w znacznym stopniu determinują właściwości użytkowe wielu odpowiedzialnych maszyn.

Obróbka elektroerozyjna może być stosowana w celu kształtowania wyrobów i usuwania naddatku obróbkowego z przedmiotów wykonywanych z materiałów trudnoskrawalnych, ale także obróbki przedmiotów z materiałów o dobrej skrawalności, ale cechujących się skomplikowanym kształtem, czasem niemożliwym do wykonania obróbką skrawaniem lub wyrobów o małej sztywności, gdyż nie występują w niej siły skrawania obecne w różnych

procesach obróbki skrawaniem. Usuwanie materiału przedmiotu obrabianego w trakcie obróbki EDM jest skutkiem impulsowych wyładowań elektrycznych, wydzielania się ciepła, powstawania kanału plazmowego, topienia się i parowania materiału oraz innych zjawisk gazodynamicznych pomiędzy elektrodami, którymi są przedmiot obrabiany (katoda) i elektroda robocza (anoda), znajdującymi w środowisku dielektryka (ośrodka roboczego). Ze względu na naturę zachodzących w procesie zjawisk, obróbka EDM jest możliwa do zastosowania w przypadku materiałów o odpowiednio dużej przewodności elektrycznej.

Badania naukowe, prowadzone m.in. w zespole profesora dr. hab. inż. Bogdana Nowickiego na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Warszawskiej a także dr. hab. inż. Sławomira Spadło, prof. PŚk na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej, oraz będące ich rezultatem publikacje wskazują na dużą perspektywiczność zastosowania obróbki elektroerozyjnej na etapie obróbki wykończeniowej przedmiotu obrabianego (PO) także do modyfikacji składu chemicznego istniejącej warstwy wierzchniej tegoż przedmiotu lub wręcz nakładania na jego powierzchnie powłok o określonych właściwościach fizyko-chemicznych. Materiał nakładany na przedmiot obrabiany pochodzi z elektrody roboczej a jego nakładanie w procesie EDM jest określane mianem stopowania elektroiskrowego (Electrical Discharge Alloying – EDA). Mając na uwadze złożone kształty przedmiotów obrabianych oraz, w określonych przypadkach, ich małą sztywność, uzasadnione jest, z powodu właściwego przebiegu procesu, stosowanie elektrod roboczych, które są elastyczne. Recenzowana rozprawa doktorska podejmuje właśnie tę tematykę.

Głównym przedmiotem zainteresowania Autora pracy było zbadanie wpływu cech elektrody roboczej i parametrów obróbki na właściwości warstwy wierzchniej po stopowaniu elektroiskrowym i opracowanie zdobytej wiedzy w celach poznawczym i utylitarnym. Tematyka ta jest ważna w obu aspektach. Obejmuje badanie szeregu czynników związanych z procesem EDA i właściwościami stosowanych materiałów. Należy mieć na uwadze, że zapewnienie odpowiedniej efektywności procesu stopowania elektroiskrowego jest bardzo często trudnym problemem wtedy, gdy stawia się również wysokie wymagania dotyczące właściwości warstwy wierzchniej PO po procesie EDA. Istotne jest tu m.in. uzyskanie pożądanych wartości twardości, wytrzymałości, odporności na korozję oraz wybranych parametrów struktury geometrycznej powierzchni PO, ukierunkowania struktury czy rozkładu naprężeń własnych. Ten problem badawczy wymaga wykonania kompleksowych badań i analizy ich wyników w celu lepszego niż dotąd rozumienia relacji między czynnikami odgrywającymi rolę w procesie oraz sformułowania wytycznych, mogących służyć za punkt wyjścia do opracowania podstaw technologicznych EDA w konkretnych zastosowaniach. Przedstawione argumenty wskazują jednoznacznie na istotność i aktualność podjętej w rozprawie tematyki, biorąc pod uwagę zarówno aspekt poznawczy, jak

i utylitarny. Podjęcie przez Doktoranta badań dotyczących wpływu cech elektrody roboczej i parametrów obróbki na właściwości warstwy wierzchniej po stopowaniu elektroiskrowym jest w pełni uzasadnione. Temat rozprawy doktorskiej dobrze odwzorowuje zawarte w niej wyniki badań naukowych.

2. Charakterystyka rozprawy.

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 174 strony, a w tym: 1 strona streszczenia w języku polskim, 1 strona streszczenia w języku angielskim, 3 strony spisu treści, 2 strony wykazu stosowanych oznaczeń, 1 strona wykazu stosowanych skrótów, 151 stron zasadniczej części rozprawy oraz 6 stron spisu literatury (117 pozycji literatury). Rozprawa zawiera 5 numerowanych rozdziałów.

We wstępie (str. 17-19) Doktorant przedstawia ideę obróbki elektroerozyjnej wraz z opisem obszarów ich zastosowania. W podanych opisach odwołuje się do wybranych, odpowiednich pozycji literatury.

W **rozdziale 1** (str. 20-53) Autor przedstawia charakterystykę obróbki elektroerozyjnej. Dokonuje klasyfikacji procesów EDM, omawia ich podstawy fizyczne oraz prezentuje zwięzły przegląd obrabiarek EDM. W dalszej kolejności przedstawia najważniejsze elementy składowe tych obrabiarek oraz wymagania stawiane generatorom zasilającym obwody robocze obrabiarek elektroerozyjnych. Autor zwraca uwagę na różne stany występujące w szczelinie międzyelektrodowej, których monitorowanie jest niezbędne dla prawidłowego działania układu sterowania generatorem i układu regulatora szczeliny roboczej. Następnie omawia energię wyładowań elektrycznych w szczelinie międzyelektrodowej i ocenę wpływu wybranych parametrów impulsu elektrycznego na efekty procesu obróbki elektroerozyjnej. Przedstawione informacje są z kolei podstawą do przedstawienia różnych klasyfikacji generatorów używanych w obróbce EDM oraz omówienia głównych trendów ich rozwoju. Mając na uwadze zarówno zakłócenia elektromagnetyczne generowane przez obrabiarkę EDM, jak i zewnętrzne zakłócenia, pochodzące od obcych pól elektromagnetycznych Doktorant prezentuje także istotne informacje dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej (EC – Electromagnetic Compatibility) zespołów elektrycznych i elektronicznych obrabiarek. Tę część rozprawy oceniam wysoko, gdyż Autor umiał właściwe wybrać, usystematyzować i opisać złożone zagadnienia dotyczące obróbki i obrabiarek EDM, zawarte w różnych, cytowanych publikacjach. **Usystematyzowanie wiedzy i jej przejrzysta prezentacja to jedno z cennych osiągnięć Autora rozprawy**.

Rozdział 2 (str. 54-65) poświęcony jest zwięzłemu opisowi i charakterystyce metod stopowania elektroiskrowego. Autor w przejrzysty sposób wyjaśnia podstawy i charakterystykę kilku metod stopowania. Omawianymi metodami są:

- stopowanie z zastosowaniem elektrod pręcikowych (SWA),
- stopowanie z zastosowaniem elektrod szczotkowych (BEDMA),
- stopowanie z zastosowaniem elektrod monolitycznych (EDA).

Również i w tym przypadku **Autor przejrzyście prezentuje wybrane, najważniejsze informacje**. Rozdziały 1 i 2, mają charakter przeglądu wiedzy z zakresu podejmowanej tematyki badawczej. Wprawdzie Autor nie wskazuje w jawnej postaci, w oddzielnych konkluzjach, luk badawczych, które można próbować uzupełnić dalszymi badaniami, ale w przypadku każdej metody zwraca uwagę zarówno na zalety, jak i na ich wady. Minimalizacja lub wyeliminowanie tych wad lub niedostatków wyznaczają jednak pożądane kierunki dalszych badań naukowych, zmierzających do rozwoju metod obróbki elektroerozyjnej oraz obszarów ich racjonalnych zastosowań. Z treści rozprawy wynika, że Autor przyjął właśnie taką koncepcję opracowania oraz prezentacji dostępnej i opublikowanej wiedzy w zakresie tematyki pracy badawczej.

Rozdział 3 (str. 66-67) obejmuje przedstawienie celu i zakresu pracy. Główny cel pracy formułuje jako „... przeprowadzenie kompleksowych badań dotyczących wpływu cech elektrod roboczych i parametrów obróbki na właściwości modyfikowanej warstwy wierzchniej". Autor zwraca uwagę na to, że planowane do wykonania badania mają dotyczyć w szczególności wpływu sposobu stopowania, cech elektrod, właściwości ośrodka roboczego i parametrów elektrycznych źródła zasilania na możliwości stopowania prowadzonego w warunkach wyładowań elektroiskrowych. Mają one również prowadzić do porównania rezultatów stopowania elektrodami kształtowymi (monolitycznymi), pręcikowymi-drgającymi i elektrodami obrotowymi (szczotkowymi).

Oprócz celu głównego wyznacza również cele składowe, które dotyczą:

- określenia możliwości użycia stopowania elektroiskrowego powierzchni kształtowanych elektrodami monolitycznymi, wykonanymi z materiałów stopowych jako potencjalnego sposobu ulepszania powierzchni wyrobu, np. powierzchni gniazd matryc kuźniczych;
- określenia zakresów wartości parametrów elektrycznych, przy których zachodzi efektywny transport masy;
- oceny wpływu rodzaju elektrod na efektywność obróbki i stan warstwy wierzchniej (brane pod uwagę są elektrody pręcikowe, monolityczne i szczotkowe);
- oceny wpływu ośrodka roboczego na stan warstwy wierzchniej;

- określenia możliwości zastosowania typowych zasilaczy, używanych w obrabiarkach EDM, poprzez zmianę biegunowości zasilania elektrod do stopowania;
- opracowania podstaw racjonalnego wyboru sposobu stopowania elektroiskrowego i jego parametrów w zależności od celu i wymaganych efektów obróbki.

Zakres pracy został dobrany tak, aby ujawnić wpływ warunków procesu stopowania na stan warstwy wierzchniej. Autor zwrócił przy tym uwagę na szereg ważnych aspektów, wśród których znajdują się:

- grubość i równomierność nanoszenia powłok,
- mikrostruktura metalograficzna modyfikowanych warstw,
- skład chemiczny warstwy wierzchniej,
- chropowatość powierzchni,
- mikrotwardość,
- wydajność obróbki,
- rodzaj i postać materiału anody (4 materiały),
- wybrane parametry obróbki – napięcie U i natężenie I prądu elektrycznego, czas impulsu t_i, czas przerwy t_0 i czas obróbki t_{ob}.

Rozdział 3 zawiera również schemat procesu stopowania metodami EDA i BEDMA jako obiektu badań, który w obrazowy sposób prezentuje czynniki, które występują w procesie obróbki elektroerozyjnej metodami EDA i BEDMA. Schemat ten łączy w sobie czynniki wejściowe z rezultatami obróbki i czynnikami ekonomicznymi.

Postawione przez Autora cele i zakres pracy odzwierciedlają istotę planowanych badań i dalszych analiz. Wskazują także na niezbędne doświadczenia, których wykonanie jest wskazane aby osiągnąć ww. cele rozprawy. Należy zauważyć, że analiza podanych przez Autora celów oraz zakresu badań wskazuje na bardzo obszerny program badań. Wynika z niego bardzo duża liczba zadań do wykonania oraz informacji do przeanalizowania.

Rozdział 4 (str. 68-165), największy rozdział rozprawy doktorskiej zwiera opis warunków i metodyki badań eksperymentalnych procesów stopowania z wykorzystaniem wyładowań elektrycznych a także wyniki wykonanych badań. W pierwszej kolejności zwięźle scharakteryzowano aparaturę badawczą użytą w badaniach w celu przygotowania zgładów metalograficznych próbek, obserwacji i rejestracji przebiegów sygnałów elektrycznych, obserwacji mikrostruktury materiału próbek, mikroanalizy rentgenowskiej, pomiarów mikrotwardości, zmiany masy i struktury geometrycznej powierzchni oraz do oceny właściwości tribologicznych powierzchni próbek po stopowaniu. Należy stwierdzić, że aparatura pomiarowa została dobrana właściwie do założonych zadań badawczych i pomiarowych. Wyniki badań eksperymentalnych zostały przedstawione i omówione w podrozdziałach poświęconych kolejnym badanym metodom

stopowania elektroiskrowego, tj. SWA, BEDMA i EDA. W szczególności Autor przedstawił na str. 85-126 opis stanowiska badawczego, charakterystykę czynników wpływających na przebieg procesu stopowania oraz wyniki badań eksperymentalnych próbek po stopowaniu elektrodą pręcikowo-drgającą (metoda SWA). W przypadku metody stopowania z użyciem elektrod szczotkowych (metoda BEDMA) Autor opisał stanowisko badawcze i przedstawił wyniki badań stanu warstwy wierzchniej próbek po stopowaniu (str. 126-134). W odniesieniu do procesu stopowania elektroiskrowego elektrodą monolityczną (metoda EDA) Autor przedstawił zwięzłą charakterystykę procesu, plan eksperymentu oraz opisał wyniki, dotyczące zmiany masy, grubości warstwy białej i stanu warstwy wierzchniej próbek po stopowaniu (str. 134-164). Wyniki ilościowe przedstawione są w tabelach oraz na wykresach. Wyniki jakościowe, pokazane na licznych fotografiach mikrostruktury materiału a także wyniki analizy składu chemicznego warstwy wierzchniej próbek po stopowaniu, opatrzone są trafnymi opisami i komentarzami.

W przypadku wyników badań efektów stopowania elektroiskrowego z użyciem elektrody monolitycznej przeprowadzono także analizę statystyczną (str. 141-146), wykorzystując analizę regresji, w ramach której przyjęto funkcje wykładnicze przybliżenia grubości warstwy białej w zależności od natężenia prądu i czasu trwania impulsu. Wykładnicze modele regresyjne uzyskano również dla przybliżenia zmiany masy próbek w zależności od napięcia prądu w przypadku stopowania próbek elektrodą pręcikową-drgajacą SWA (rys. 4.28, 4.31). Obliczone współczynniki korelacji wskazują na dobre dopasowanie do danych eksperymentalnych wyznaczonych modeli zmiany masy próbek po stopowaniu metodą SWA.

W odniesieniu do badań przebiegu napięcia w szczelinie międzyelektrodowej, opisanych na stronach 78-84 rozprawy za cenne uważam scharakteryzowanie, w kategoriach napięcia natężenia i czasu, wyidealizowanego przebiegu napięcia i natężenia prądu elektrycznego w szczelinie międzyelektrodowej, który przejrzyście pokazano na rys. 4.14.

Wnioski zawarte w podrozdziale 4.6 są uzasadnione uzyskanymi wynikami badań.

Ostatni numerowany **rozdział 5** rozprawy zawiera 16 wniosków o charakterze utylitarnym i poznawczym (str. 166-167). Wnioski te wynikają z przeprowadzonych badań i są ogólnie uzasadnione wynikami badań opisanymi w poprzedzających rozdziałach rozprawy. Jednak do niektórych z nich można mieć uwagi, których bliższe wyjaśnienie znajduje się w dalszej części recenzji.

Rozprawa zakończona jest spisem powoływanej literatury (str. 169-174). Zawiera on 117 pozycji dotyczących tematyki rozprawy. Są wśród nich artykuły w czasopismach, monografie książkowe, materiały konferencyjne, katalogi i normy. Na liście tej znajduje się też 10 publikacji współautorskich Doktoranta. Zdecydowana większość literatury jest z okresu ostatnich 20 lat.

3. Oryginalne osiągnięcia Doktoranta.

Za oryginalne osiągnięcia Doktoranta, uzyskane w trakcie opisanych w dysertacji badań można uznać:

- Uporządkowanie i przejrzyste przedstawienie wiedzy z zakresu obróbki elektroerozyjnej a zwłaszcza stopowania elektroiskrowego.
- Wykonanie obszernego zakresu badań eksperymentalnych, dotyczących m.in. zmiany masy próbek po stopowaniu, chropowatości powierzchni, grubości warstwy białej, stanu warstwy wierzchniej, mikrostruktury, mikrotwardości i współczynnika tarcia, które umożliwiają określenie relacji między warunkami i parametrami procesu stopowania elektroiskrowego a obserwowanymi parametrami wyjściowymi.
- Wyciągnięcie wniosków poznawczych i utylitarnych odnośnie badanych metod stopowania SWA, BEDMA i EDA.

4. Ogólna ocena merytoryczna rozprawy.

Oceniana rozprawa w pełni mieści się w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna. Zawiera podstawowe elementy pracy doktorskiej. Prowadzi do wniosków poznawczych oraz utylitarnych. Ma charakter przede wszystkim eksperymentalny i ma duży potencjał z punktu widzenia zastosowania jej wyników w praktyce przemysłowej, co jest bardzo cenne.

Przedstawiona w recenzowanej rozprawie tematyka jest trudna i złożona ze względu na różnorodność zjawisk fizyko-chemicznych i liczność obserwowanych informacji. **Zastosowana w badaniach opisanych w rozprawie metodyka i środki badawcze, użyte w badaniach eksperymentalnych umożliwiły uzyskanie ważnych informacji służących ocenie wybranych procesów stopowania elektroiskrowego. Dzięki wykonanym badaniom Doktorant poszerzył stan wiedzy w odniesieniu do zadań objętych zakresem pracy. Cel rozprawy został osiągnięty a zasadnicze wnioski mają uzasadnienie w opracowanych wynikach badań. Z merytorycznego punktu widzenia oceniam pracę pozytywnie.**

5. Uwagi krytyczne lub dyskusyjne do rozprawy.

Lektura rozprawy doktorskiej skłania do sformułowania następujących pytań lub uwag krytycznych ew. dyskusyjnych:

1. Str. 55 – Jak można wyjaśnić powstawanie wyładowania mimo kontaktu elektrod?

2. Str. 67, rys. 3.1 – Jaki jest obiekt badań dla procesu SWA? Przedstawiony obiekt badań jest raczej przykładowym schematem łączącym czynniki wejściowe procesu z efektami obróbki i czynnikami ekonomicznymi. Umieszczenie go w punkcie dotyczącym zakresu pracy jest trochę mylące, bo np. dla metody BEDMA nie wykonano niektórych badań, które sugerują parametry wyjściowe na rys. 3.1. Być może, jako ogólny schemat, mógłby być umieszczony we wstępie teoretycznym, np. w rozdziale 2. Jeśli badane parametry były indywidualne dla każdego z procesów SWA, BEDMA i EDA, to dla każdego badanego procesu można było wskazać obiekt badań osobno i przedstawić co będzie parametrami wejściowymi, a co wyjściowymi.

3. Analiza zawartości rozdziału 4 oraz fakt, że po nim następują już tylko wnioski ogólne z całości wykonanych badań (rozdział 5) i spis literatury wskazują jednak, że tytuł rozdziału jest zbyt wąski pojęciowo, ponieważ rozdział ten zawiera w istotnej części także wyniki badań i ich omówienie. Zatem uzasadnione w tej sytuacji byłoby opracowanie zamiast obecnego rozdziału 4 dwóch rozdziałów, z których pierwszy zachowałby obecną nazwę, tj. „Warunki i metodyka badań eksperymentalnych procesów stopowania z wykorzystaniem wyładowań elektrycznych" i koncentrowałby uwagę właśnie na warunkach wykonania badań i metodyce a drugi pt. np. „Wyniki badań eksperymentalnych" przedstawiałby wyniki badań doświadczalnych. Alternatywnie, jeśli przyjąć koncepcję jednego dużego rozdziału badań własnych, należałoby zmienić obecny tytuł rozdziału 4 na „Warunki, metodyka i wyniki badań eksperymentalnych procesów stopowania z wykorzystaniem wyładowań elektrycznych".

4. Zaprezentowane na rys. 4.16 osiem przykładowych oscylogramów, ilustrujących zmiany napięcia w szczelinie międzyelektrodowej, jest cytowanych w tekście z opisem wskazującym na obecność „... kilku charakterystycznych faz napięciowo-czasowych: przed impulsem, w trakcie impulsu i po zaniku impulsu". Szkoda, że ta informacja, będąca przyczyną umieszczenia w rozprawie ww. oscylogramów, nie została na żadnym z nich wyraźnie wskazana. Przydatne do dalszej analizy byłoby także wyjaśnienie, odniesione do powoływanego rys. 4.16, czym różni się faza „przed impulsem" od fazy „po zaniku impulsu" w procesach zmiennych okresowo, jak te pokazane na rys. 4.16.

5. Wyniki przedstawione na rys. 4.36 i następnie zestawione na rys. 4.40 dla warstw 4 i 5 są niespójne (pomyłkowa zamiana wartości na obu wykresach?). Co oznaczają gwiazdki przy ilości warstw na rys. 4.40?

6. Str. 109 – na górze strony dla pojemności 150 μF podano zakres otrzymanych wartości Rp 15,36-19,38 μm. Na wcześniejszym rys 4. 46b parametr Rp przyjmuje 12,8 μm. Podobnie

dla pojemności 300 μF parametr Ra przyjmuje zakres 3,21 – 4,02 μm, a na rys. 4.46c-d jest 6,04 μm i 5,69 μm. Także Rp zakres wynosi 17,96-20,08 μm, a na rys. 4.46c-d jest 25,6 μm oraz 22.1 μm. Jak można uzasadnić te różnice?

7. W tab. 25 przedstawiono wyniki dla 14 prób. Nie podano wcześniej jakie były parametry wejściowe tych prób. Podany na rys. 4.26 schemat planu eksperymentu przewidywał 10 punktów w przestrzeni stanu. W tabeli 10 przedstawiono 10 konfiguracji parametrów wejściowych. Być może wystąpiły powtórzone próby, jednak dobrze byłoby wskazać dla każdej z 14 prób parametry wejściowe i wyjaśnić skąd są dodatkowe 4 próby.

8. Na rys. 4.46 pojawiają się numery prób a13, a21, a18, a23. Być może są istotne dla Autora ze względu na porządkowanie wyników, ale w podpisach rys. 4.47-4.54 Autor posługuje się oznaczeniami prób A11, A12, A19, A21, A22, A23, A24, A25. Zapewne są istotne pod kątem interpretacji ale nie zostały wcześniej uszeregowane i nie zostały przypisane im parametry wejściowe. Podobnie jest na str. 119-120.

9. Jakie może być wyjaśnienie tego, że rozkład mikrotwardości dla próby A13 (rys. 4.58) tak mocno odbiega od pozostałych prób?

10. Podpunkt 4.4.2 – w jaki sposób określono wartości natężenia prądu dla przeprowadzonych prób (dla gazu ochronnego – argonu i cieczy – wody destylowanej).

11. Dla procesu BEDMA nie wykonano badań dotyczących parametrów wyjściowych określonych w obiekcie badań na rys. 3.1 (podrozdział 3.2 „Zakres pracy").

12. Str. 101, rys. 4.35 – dla U = 84 V i C = 150 μF wartość Ra była wyraźnie mniejsza niż w pozostałych próbach, mimo znacznie mniejszego napięcia. Dlaczego? Tego efektu nie zauważono przy tym samym napięciu ale pojemności C = 300 μF.

13. Str. 102, rys. 4.36 – jak można wytłumaczyć powstawanie warstwy modyfikowanej gdzie Ra przyjmuje mniejszą wartość (około Ra = 3,66 μm) przy strategiach z narastającym napięciem w kolejnych warstwach stopowania (3 i 5 warstw) gdzie ostatnie warstwy nakładano przy napięciu U = 106 V w porównaniu to odwrotnej strategii, w której napięcie zmniejszało się wraz z kolejnymi warstwami (4 warstwy) gdzie ostatnią warstwę nakładano przy U = 38 V, a Ra wyniosło 4,06 μm. Całość wykonano przy C = 150 μF. Dlaczego występują różnice na wykresach pokazanych na rys.4.36 i 4.40 (str. 103) w odniesieniu do tendencji zmian parametru Ra dla C = 150 μF?

14. Str. 103 – z kolei na rys. 4.38, gdzie pojemność kondensatora C zwiększyła się do 300 μF wartość Ra jest najmniejsza (odwrotnie niż dla C = 150 μF) dla strategii 4-warstwowej z najniższym napięciem dla ostatniej nakładanej warstwy.

15. Str. 106 – rys. 4.43 – podobnie, grubość warstwy białej jest wyraźnie większa w strategii 4-warstwowej mimo najmniejszego napięcia w ostatniej stopowanej warstwie.

16. Str. 133 – rys. 4.71 – Jak wytłumaczyć tak mocno zaburzone charakterystyki zmiany masy próbki przy stopowaniu w wodzie destylowanej?

17. Str. 139 – dlaczego odrzucono czas ti powyżej 3200 μs?

18. Co działo się z pozostałymi, poza natężeniem prądu I, parametrami (w szczególności elektrycznymi), np. opisanymi na str. 127, w opisywanych metodach. Czy możliwe było ich ustawienie na określonym poziomie wartości? Jeśli tak, to jakie wartości (nastawy) przyjęto? Jeśli nie, to czy zmieniały się one w dużym, czy niewielkim zakresie?

19. Str. 140 – czy dla elektrod z węglika spiekanego wolframu i elektrody napylanej także korzystano z tego planu?

20. Str. 140 – gdzie są wyniki zmiany masy po stopowaniu pozostałymi elektrodami z wolframu, węglika spiekanego wolframu i elektrody napylanej?

21. Brakuje pełnego opisu warunków badań dla procesu stopowania elektrodą monolityczną (użytych narzędzi). Na str. 140 pojawia się informacja, że plan eksperymentu zawarty w tab. 26 odnosi się do elektrod z X10CrNi18-8 (1H18N9) oraz z wolframu. Natomiast na str. 144 przedstawiono wyniki także dla elektrod z węglika spiekanego wolframu i elektrody napylonej (brak wspomnienia o nich wcześniej).

22. Str. 144 – napisano, że „... niektóre współczynniki (test t Studenta) ze względu na niespełnienie zależności $t \geq tkr$ będą nieistotne". Gdzie porównano te wartości testu t Studenta i które współczynniki okazały się w rozpatrywanych modelach nieistotne?

23. Str. 144 – napisano, że równania regresji wyznaczono dla każdego materiału elektrody, skupiając uwagę na relacji między stałymi wejściowymi a wydajnością obróbki. Nie jest wyjaśnione co rozumie się pod pojęciem wydajności obróbki. Czy jest to tożsame ze zmianą masy Δm, czy z grubością warstwy białej G_{WB}? W obróbce elektroerozyjnej może wystąpić, w ogólności także ubytek masy. Dlaczego, zatem, przedstawiono równanie jedynie dla GWB i elektrody X10CrNi18-8 (1H18N9)?

24. Str. 145 – parametry HV_{WB} i HV_{SWC} nie są uwzględnione w spisie parametrów i nie są wyjaśnione w tekście. Zapewne są to parametry określające twardość warstwy białej i strefy wpływów cieplnych. Czy dla tych parametrów także miały powstać modele?

25. Równanie (4.9) na str. 145 – jaka jest wartość współczynnika korelacji R dla tego modelu?

26. Czy 3 modele dla $G_{WB}(I, t)$ dla pozostałych elektrod różnią się w istotnym stopniu od modelu przedstawionego na str. 145.

27. Czy 4 modele dla $\Delta m(I, t)$ dla wszystkich elektrod, których w rozdziale nie umieszczono, wykazały dobre dopasowanie do danych eksperymentalnych?

28. Str. 151 – ile próbek wykonywano dla każdego zestawu nastaw? Na rys. 4.96-4.98 przedstawiono mikrostruktury prób przeprowadzonych z tymi samymi parametrami. Skąd mogą wynikać tak znaczne różnice w rozkładzie warstwy białej na powierzchni próbek 30P, 24P, 28L? Podobnie dla próbek 29L i 30L (str. 150) – w jednym przypadku rozkład warstwy białej w postaci „łódek" (odzwierciedlający działanie wyładowań) jest widoczny, a w drugim nie.

29. Czy na rys. 4.102-4.104 przedstawiono mikrostruktury tej samej próbki 26P?

30. Str. 158 – czy dla elektrody napylanej wykonano cały plan z tab. 26? Jeśli nie, to które próby wykonano i dlaczego przyjęto taki wybór?

31. Str. 161-163, rys. 4.119-4.121 – dlaczego zawartość węgla przedstawiono tylko dla pierwszej analizowanej próbki?

32. Str. 166 – wniosek 1 – „... tańsza alternatywa ..." – tańsza od czego?

33. Str. 166 – wniosek 5 – co pozwoliło na sformułowanie takiego wniosku?

34. Str. 166 – wniosek 9 – czy w pozostałych metodach chropowatość jest akceptowalna w eksploatacji zmodyfikowanego wyrobu? Czy mierzono chropowatość po obróbce BEDMA i elektrodą monolityczną?

35. Str. 166 – wniosek 13 – „... optymalne parametry obróbki uzyskano ..." – jakie były kryteria, z uwzględnieniem których wyznaczono wspomniane we wniosku wartości parametrów? Ponadto, przydałoby się bliższe wyjaśnienie fragmentu zdania we wniosku 11 o treści „... uzyskując pewną grubość o łagodnej, spójnej powierzchni"?

36. Str. 166 – wniosek 14 – dotyczy wydajności obróbki. Szkoda, że nie wyjaśniono na czym polega wydajność w tym procesie, z uwagi na wzrost masy jak i jej ew. zmniejszanie się przy wybranych parametrach. Jak wydajność interpretować w przypadku spadku masy. Należy zapewne założyć, że przypadki, w których występuje zmniejszenie masy są nieakceptowalne, gdyż w takiej sytuacji nie zachodzi proces stopowania? Należy zatem wykluczać zestawy parametrów dające taki rezultat w stopowaniu elektroiskrowym, tym bardziej, że – jak stwierdzono we wniosku 16 – proces stopowania jest wrażliwy na parametry obróbki. Ułatwiłoby to interpretację wydajności obróbki.

6. Uwagi formalne odnoszące się do redakcji rozprawy.

Rozprawa doktorska napisana jest poprawnym językiem i ogólnie jest czytelna, jednak Autor nie ustrzegł się w zakresie redakcji i języka pewnych niedociągnięć lub błędów, których natura jest bliżej wyjaśniona w dalszej części recenzji.

Niżej podane uwagi formalne, dotyczące redakcji rozprawy odnoszą do jej czytelności i nie zmieniają jej ogólnie pozytywnego przekazu merytorycznego.

1. Str. 13 – zamiast „warność" powinno być „wartość".
2. Str. 19 – zamiast „towarzyszącym" powinno być „towarzyszących".
3. Str. 28 – zamiast „między elektrodowej" powinno być „międzyelektrodowej".
4. Str. 31 – niejednolity styl podpisywania rysunków (rys) i tabel (tabela) i drobne błędy językowe dotyczące odwołań do tabel w tekście.
5. Str. 31 – parametr związany z natężeniem prądu jest zastąpiony potocznie stosowanym słowem „prąd", które w tym kontekście pojawia się wielokrotnie w treści pracy. Sformułowanie „Prąd szczeliny" ma charakter potoczny (skrótowy) i powinno być zastąpione przez np.: „Natężenie prądu w szczelinie (roboczej)".
6. Str. 36 – niejednolite oznaczenia parametrów we wzorze (1,1) i w opisie $t_e - t_w$.
7. Str. 36 – chropowatość zamiast „chropowatość przedmiotu" powinno być „chropowatość powierzchni" lub „chropowatość powierzchni przedmiotu".
8. Str. 40 – rys. 1.15b jest kopią 1.15a. Poniżej jest prawdopodobnie poprawny rysunek z cytowanej publikacji [88].

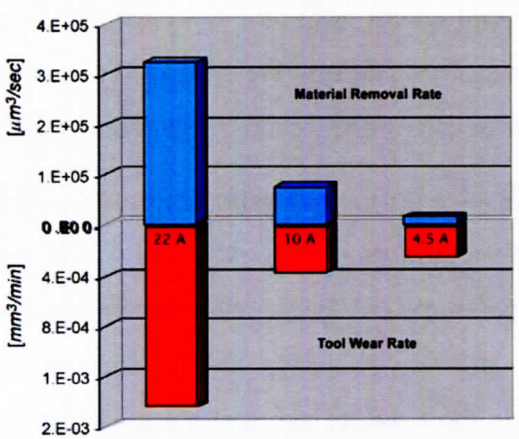


Fig. 3. Material removal and tool wear rate vs. EDM pulse current.

9. Strony: 42, 46, 73, 78, 79, 80, 88, 94, 95, 100, 104, 108, 121, 122, 132, 140, 141, 142 – brak tzw. wcięć pierwszej linii akapitów.

10. Str. 51 – zamiast „linowe" powinno być „liniowe".

11. Str. 79, 100 – odwołanie do rysunku – niepotrzebnie nawias i podwójne odwołanie, czyli zamiast „... przedstawiono na rysunku (rys. 4.13)" powinno być „... przedstawiono na rys. 4.13".

12. Str. 80 – rys. 4.14 – brak oznaczenia Igw na przebiegu natężenia prądu.

13. Str. 82 – pojęcia „elementy pasożytnicze" oraz „parametry pasożytnicze" są zbyt kolokwialne. Wprawdzie niektóre elementy układów elektrycznych i elektronicznych mogą negatywnie wpływać na wybrane, oczekiwane efekty działania danego układu, ale zwykle są one również niezbędne w celu spełnienia innych funkcji danego układu. W przeciwnym wypadku nie występowałyby w strukturze danego układu. Określenie ich w pracy badawczej jako „pasożytniczych" nie jest właściwe.

14. Str. 88 – zamiast „w skutek" powinno być „wskutek".

15. Str. 90 – tabela 6 – dlaczego parametry SHTp i Smr występują dwukrotnie? tabela 7 – dlaczego parametr SPc występuje dwukrotnie?

16. Str. 91 – zamiast wymieniania wszystkich elementów ciągu arytmetycznego numerów rysunków powinno się pisać np. „od rys. 4.21 do rys. 4.25" lub „rys. 4.21-4.25". Podobnie jest w przypadku odwołań do tabel na str. 96 i rysunków na str. 97, str. 105 i str. 135.

17. Str. 92-93 – rys. 4.21-4.25 – mało wyraźne niektóre opisy osi wykresów: skala na mikrofotografii, skale obrazów przestrzennych i map wysokościowych.

18. Str. 101-104 – Wyniki pomiarów chropowatości powierzchni są opisane bardzo lakonicznie oraz brakuje odwołań, z wyjątkiem tab. 20, do rysunków i tabel w całym podpunkcie.

19. Przypisanie liczby porządkowej próbom w tab. 11 mogłoby być potraktowane jako numer próby i kontynuowane w tab. 13 i tab. 15. Poprawiłoby to przejrzystość i uporządkowanie znacznej liczby wyników tego podpunktu.

20. Czy konieczne było przedstawienie wykresów 4.27 i 4.30, skoro dane na nich zilustrowane znajdują się w tabelach 12 i 14 oraz pokazano wyniki analizy regresji na rys. 4.28 i 4.31 a także przedstawiono je zbiorczo na rys. 4.33. Podobnie dla rys. 4.35-4.38 – te same dane umieszczono na rys. 4.39 i 4.40.

21. Str. 99 – rys. 4.32 – brak średniego przyrostu masy na wykresie. Niejednolity opis osi – „liczba warstw", podobnie jak na rys. 4.36, a na rys.4.29 – „ilość warstw".

22. Niejednolity styl podpisów rysunków i tabel – pojawiające się kropki i przecinki na końcu podpisów, dość licznie w podpunkcie 4.3.3.

23. Pojawiające się nadmiarowe kropki przy jednostkach np.: „min." – w podpisach rysunków podpunktu 4.3.3, tab. 18. Brakujące w niektórych miejscach odstępy między miarą wartością parametru a jednostką.

24. Str. 99 – rys. 4.31 – w opisie osi parametr napięcia U bez kursywy, podobnie rys. 4.44. Powinien być U.

25. Str. 105-107 – brak odwołań do rysunków 4.42-4.45, brak spacji przed jednostką pojemności kondensatora w kilku podpisach.

26. Formatowanie na rys. 4.56-4.59 jest nieujednolicone, pojawiają się nieprawidłowe oznaczenia jednostek mikrometrów na osi poziomej. Na rys. 4.56 nie oznaczono granicy warstwy białej i strefy wpływów ciepła.

27. Str. 122 – parametry bez kursywy, podobnie podpisy rys. 4.64-4.66.

28. Nie omówiono rys. 4.71.

29. Str. 139 – rys. 4.80 niekonsekwentnie, w stosunku wprowadzonych wcześniej oznaczeń, oznaczony parametr czasu impulsu $t_{imp} - t_i$.

30. Str. 139 –brak odstępu miedzy podpisem rys. 4.80 i tab. 26.

31. Str. 142 - niekonsekwentnie oznaczony parametr czasu impulsu $T_i - t_i$.

32. Str. 142 – zamiast „liczny" powinno być „liczby".

33. Str. 143 – brak kursywy przy zapisie parametrów.

34. Str. 145 – tablica nieobjęta dotychczasowym ciągiem numeracji.

35. Str. 145 – rys. 4.82 – graficzne przedstawienie równania regresji, którego nie umieszczono w treści rozprawy. Graficzna ilustracja 3D dotyczy zmiany masy Δm, a nie grubości warstwy białej G_{WB}. W podpisie: „... stal 45 ..." a w innych miejscach „C45".

36. Str. 146, pierwszy akapit na stronie – z których wykresów wyników badań skorzystano?

37. Podpunkt 4.5.4 – czy numery próbek umieszczone w podpisach rysunków np.: 18L, 17L mają znaczenie dla czytelnika? Mogą wprowadzać zamieszanie, bo nie pokrywają się z numerami umieszczonymi w tab. 27. Idea wprowadzenia oznaczeń próbek jest słuszna ale powinna być wykonana dokładnie i w pełni aby spełnić swoje zadanie – uporządkować wyniki. W przeciwnym razie mogą działać odwrotnie.

38. Str. 146-159, rys. 4.83-4.118 – pomocne mogłoby być umieszczenie skali na fotografiach, gdyż pozwoliłoby to szybko oszacować grubość poszczególnych warstw w różnych miejscach na obrazach przedstawianych mikrostruktur. Pomocne także byłoby wskazanie miejsca pomiaru grubości warstwy białej, której wartość umieszczano w podpisach ww. rysunków.

39. Brak odwołania do rys. 4.90 i 4.91.

40. Str. 149 – funkcja SPIN – brak wyjaśnienia w wykazie skrótów. Nie wspomniano o zastosowaniu takiej funkcji w warunkach badań. Nie opisano jak ta funkcja działa i na co wpływa.

41. Str. 150 – lakoniczny opis wyników badań w podpunkcie, brak odwołań do rys. 4.93-4.105.

42. Str. 154 – lakoniczny opis wyników badań w podpunkcie, brak odwołań do rys. 4.106-4.116.

43. Str. 158 – w akapicie poniżej rys. 4.116 występuje powtórzenie informacji dotyczącej grubości warstwy białej.

44. Str. 160 – akronimu EDS nie wyjaśniono i nie umieszczono w wykazie skrótów.

45. Str 165 – Ostanie zdanie na dole strony zawiera wyniki badań. Z tego powodu powinien być umieszczony przed wnioskami.

46. Str. 166 – wniosek 4 – wniosek oczywisty, jeśli tylko sprecyzuje się dodatkowo pojęcie „optymalne wyniki procesu".

47. Str. 166 – wniosek 8 – brak orzeczenia.

48. Str. 166 – wniosek 10 – niepoprawne sformułowanie „Ograniczenie to dotyczy metody elektrodą szczotkową, ze względu na …". Ponadto, użyte dalej we wniosku pojęcie „metody wibracyjnej" nie było wcześniej wyjaśnione. Być może chodzi o metodę SWA, ale jeśli tak, to w rozprawie posługiwano się inną nazwą tej metody. Uwaga ta dotyczy także wniosku 15.

49. Str. 167 – wniosek 11 – sformułowanie „najbardziej optymalne" jest nieprawidłowe. Ponadto, zamiast „czasie" – powinno być „czas".

50. Str. 169 – w 3. pozycji spisu literatury powinna być podana data dostępu do danego pliku pdf na stronie internetowej.

7. Wniosek końcowy.

Przyjęty do realizacji temat rozprawy doktorskiej jest samodzielnym zadaniem naukowym. Jego rozwiązanie wymagało od Doktoranta umiejętności analizy danych literaturowych, znajomości zagadnień dotyczących obróbki elektroerozyjnej, umiejętności prowadzenia badań eksperymentalnych w tym zakresie, m.in. pomiarów wielkości geometrycznych i elektrycznych oraz dotyczących masy i składu chemicznego, znajomości metodologii prowadzenia badań oraz umiejętności samodzielnego ich prowadzenia. Potrafił przygotować odpowiednie stanowiska badawcze, właściwie zestawić i zastosować aparaturę pomiarową, przeprowadzić badania oraz wyciągnąć wnioski.

Mimo przedstawionych powyżej uwag całość rozprawy oceniam pozytywnie. Uważam, że ***recenzowana rozprawa doktorska reprezentuje aktualną i ważną, zwłaszcza dla praktyki przemysłowej, tematykę. Rozprawa jest wartościowa i wnosi nową wiedzę do dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna" w odniesieniu do metod stopowania elektrodami kształtowymi (monolitycznymi), pręcikowymi-drgającycmi oraz obrotowymi (szczotkowymi).*** W rezultacie wykonanych badań ***Doktorant osiągnął postawiony cel zasadniczy pracy doktorskiej.***

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Krzysztofa Łakomca pt. „Badanie wpływu cech elektrody roboczej i parametrów obróbki na właściwości warstwy wierzchniej po stopowaniu elektroiskrowym" spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.) i wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. inż. Krzysztofa Łakomca do publicznej obrony swojej pracy.