

dr hab. inż. Rafał Świercz, prof. PW
Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

Warszawa, dn. 22.06.2022 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej
pt.:

„Wpływ zewnętrznego chłodzenia przedmiotu obrabianego na efektywność obróbki elektroerozyjnej w gazie”

Autor: mgr inż. Agnieszka Żyra

Promotor: prof. dr hab. inż. Sebastian Skoczypiec
Promotor pomocniczy: dr inż. Rafał Bogucki

Opracowano na zlecenie
Dziekana Wydziału Mechanicznego
Politechniki Krakowskiej
Pana prof. dr hab. inż. Jerzego Śładka

1. Treść i zakres rozprawy

Recenzowana praca dotyczy badania wpływu parametrów i warunków obróbki elektroerozyjnej w gazie na jej wybrane wskaźniki jakościowe. Głównym przedmiotem zainteresowania Doktorantki było wyznaczenie wpływu zewnętrznego chłodzenia przedmiotu obrabianego na efektywność obróbki elektroerozyjnej w gazie w kinematyce frezowania.

We wprowadzeniu do rozprawy Doktorantka w zwięzły sposób przedstawiła problematykę poruszanego zagadnienia.

W rozdziale II Autorka opisała stan zagadnienia obejmujący charakterystykę obróbki elektroerozyjnej. Szczegółowo opisuje zjawiska fizyczne determinujące proces usuwania materiału i ich wpływ na własności powstałej warstwy wierzchniej. Z uwagi na współczesne wyzwania ukierunkowane na stosowanie technologii neutralnych dla środowiska Autorka koncentruje swoje zainteresowanie na analizie obróbki elektroerozyjnej w gazie. Szeroko przedstawia informacje dotyczące wpływu parametrów i warunków obróbki elektroerozyjnej w gazie na procesy fizyczne determinujące usuwanie materiału oraz wskaźniki jakościowe obróbki elektroerozyjnej. Na podstawie obszernej i wnikliwej analizy stanu badań (101-pozycji literaturowych) Autorka zidentyfikowała luki w istniejącym stanie wiedzy dotyczącym badanego zagadnienia i na tej podstawie sformułowała temat oraz cel i zakres rozprawy.

W rozdziale III Doktorantka formuje cel i zakres pracy. Jako cel podstawowy przyjmuje określenie wpływu warunków obróbki elektroerozyjnej w gazie z zastosowaniem zewnętrznego chłodzenia przedmiotu obrabianego na jakość technologiczną i efektywność procesu.

Rozdział IV zawiera opis warunków badań, metodyki badawczej oraz aparatury stosowanej w badaniach. W kolejnych etapach przedstawiona szczegółowo została koncepcja badań z uwzględnieniem podziału na badania wstępne oraz badania właściwe dla dwóch materiałów Inconel 625 oraz tytan Grade 2. Badania realizowano przy zastosowaniu nowoczesnej, specjalistycznej aparatury.

W rozdziale V przedstawiono opisy i rezultaty badań doświadczalnych realizowanych w ramach dysertacji oraz ich analizę.

Badania wstępne obejmowały ocenę wpływu parametrów i warunków obróbki elektroerozyjnej tj. czasu impulsu, natężenia prądu, napięcia prądu, ciśnienia gazu, biegunowości elektrod, typu dielektryka na wybrane cechy warstwy wierzchniej, wydajność objętościową obróbki, oraz zużycie elektrody roboczej. W badaniach właściwych szczególna uwaga skoncentrowana została na wyznaczeniu wpływu zewnętrznego chłodzenia przedmiotu obrabianego oraz parametrów obróbki tj. czasu impulsu, natężenia prądu, napięcia prądu, ciśnienia gazu dla dwóch rodzajów materiałów obrabianych Inconel 625 oraz tytanu Grade 2 na:

- wybrane parametry opisujące cechy topografii powierzchni,
- wydajność objętościową obróbki,

- względne procentowe zużycie elektrody roboczej,
- prędkość liniową elektrody roboczej podczas frezowania elektroerozyjnego,
- stan fizyczny warstwy wierzchniej po obróbce.

Istotną częścią pracy jest opracowanie modeli matematycznych opisujących wpływ przyjętych zmiennych niezależnych na wskaźniki jakościowe obróbki elektroerozyjnej.

W rozdziale VI przedstawiono podsumowanie i wnioski o charakterze poznawczym i utylitarnym oraz zdefiniowano kierunki dalszych badań.

Bibliografia obejmuje 117 pozycji literaturowych, w tym dziewięć współautorskich artykułów naukowych Doktorantki. Cytowane źródła literaturowe są adekwatne do tematyki rozprawy i obejmują aktualne artykuły z czasopism naukowych, materiałów konferencyjnych i opracowań książkowych.

2. Ocena ważności podjętego problemu naukowego

Obróbka elektroerozyjna należy do nowoczesnych sposobów kształtowania elementów o złożonych kształtach wykonywanych z trudno obrabialnych materiałów. Usuwanie materiału w obróbce elektroerozyjnej następuje w wyniku oddziaływania efektów termicznych wyładowań elektrycznych zachodzących pomiędzy elektrodą roboczą a materiałem obrabianym. W wyniku wyładowania elektrycznego następuje proces częściowego odparowania i topnienia zarówno materiału obrabianego jak i elektrody roboczej. Złożoność zjawisk fizycznych determinujących proces usuwania materiału powoduje trudności w identyfikacji wpływu parametrów i warunków obróbki na jej skutki jakościowe.

W ostatnich latach obserwowane są istotne zmiany technologiczne ukierunkowane na minimalizację negatywnego wpływu obróbki elektroerozyjnej na środowisko naturalne. Jednym z ważnych obszarów badawczych w tym zakresie jest zastosowanie neutralnych dla środowiska dielektryków takich jak: powietrze, tlen, azot, czy dwutlenek węgla. Stosunkowo niewielka liczba prac badawczych dotyczy procesu obróbki elektroerozyjnej w gazie w kinematyce frezowania, w odniesieniu do analizy zjawisk fizycznych warunkujących usuwanie materiału i oceny stanu fizycznego warstwy wierzchniej.

Badania wpływu zewnętrznego chłodzenia przedmiotu obrabianego na efektywność obróbki elektroerozyjnej w gazie stanowi ważny i nowoczesny obszar badań, dotychczas nie wystarczająco scharakteryzowany w świetle dostępnej literatury. Zastosowanie zewnętrznego chłodzenia przedmiotu obrabianego w trakcie procesu w istotny sposób wpływa na zmianę przebiegu procesu usuwania materiału i kształtowania cech warstwy wierzchniej w stosunku do dotychczas opisanych w literaturze. Skoncentrowanie uwagi na efektywności obróbki elektroerozyjnej w gazie determinuje uzyskanie określonego stanu fizycznego warstwy wierzchniej, wysokiej dokładności wymiarowo kształtowej oraz niskiej chropowatości powierzchni, przy możliwie wysokiej wydajności usuwania materiału. Przeciwności oczekiwanych rezultatów procesu powoduje, iż odpowiedni dobór parametrów i warunków obróbki dla nowych materiałów, których przykład stanowi Inconel 625 oraz tytan Grade 2 wymaga opracowania nowych podstaw technologicznych obróbki. Proponowana tematyka badawcza może być również szczególnie istotna w opracowaniu podstaw technologicznych kształtowania mikroelementów z nowych trudnoobrabialnych materiałów o specjalizowanych własnościach. Dlatego wybór tematyki rozprawy, uważam za słuszny zarówno ze względów poznawczych jak i użytkowych.

3. Ocena merytoryczna

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy doktorskiej Pani Agnieszki Żyry stwierdzam, że analiza stanu zagadnienia, opracowanie oryginalnego stanowiska do badań doświadczalnych, dobór aparatury naukowo-badawczej, przedstawiony plan i metodyka badań doświadczalnych wskazuje, że praca została zrealizowana wzorowo pod względem metodycznym. Przeprowadzone badania zgodne z teorią eksperymentu planowanego oraz opracowanie wyników badań, prezentują wysoki poziom merytoryczny.

Rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki Żyry charakteryzuje się wieloma aspektami nowości i oryginalności. Zagadnienie obróbki elektroerozyjnej trudnoobrabialnych materiałów tj. tytanu Grade 2 oraz Inconel 625 w gazach w kinematyce frezowania jest tematem aktualnym i trudnym do opisu ze względu na złożoność zjawisk fizycznych występujących w trakcie procesu. Należy wyrazić uznanie dla Doktorantki, za podjęcie tego trudnego i bardzo ważnego tematu w świetle potencjalnego zastosowania w kształtowaniu mikroelementów z materiałów trudnoobrabialnych.

Za największe, oryginalne osiągnięcia naukowe Doktorantki uważam wyznaczenie i opisanie wpływu głównych technologicznych parametrów i warunków procesu obróbki elektroerozyjnej w gazie w kinematyce frezowania na efektywność procesu wyrażoną jakością obrabianych powierzchni, wydajność objętościową usuwania materiału oraz zużyciem elektrody roboczej. Wyznaczone równania regresji stanowią podstawę projektowania procesów technologicznych ukierunkowanych na osiągnięcie określonych rezultatów obróbki Inconelu 625 oraz tytanu Grade 2.

Istotne z punktu widzenia rozszerzenia dotychczasowej wiedzy o procesie kształtowania elektroerozyjnego w gazie materiałów trudnoobrabialnych jest wyznaczenie wpływu zastosowania zewnętrznego chłodzenia przedmiotu obrabianego na efektywność obróbki. Przedstawiona w rozprawie analiza wyników badań doświadczalnych wraz z omówieniem zjawisk fizycznych występujących w procesie obróbki elektroerozyjnej i ich implikacji na skutki jakościowe obróbki, stanowią innowację, która istotnie poszerza dotychczasowy stan wiedzy.

Na uwagę zasługuje szeroki zakres wykonanych badań doświadczalnych z metodycznym podziałem na część badań wstępnych i właściwych obejmujący:

- wyznaczenie wpływu rodzaju zastosowanego dielektryka na wskaźniki technologiczne obróbki tj. wydajność objętościową usuwania materiału, zużycie elektrody roboczej, wybrane cechy strukturalne i morfologiczne warstwy wierzchniej,
- ocenę wpływu zewnętrznego chłodzenia przedmiotu obrabianego oraz parametrów obróbki tj: wartości natężenia prądu, napięcia prądu, czasu impulsu oraz ciśnienia gazu dostarczanego do strefy obróbki na wskaźniki jakościowe obróbki,
- opracowanie modeli matematycznych badanego procesu opartych na danych empirycznych co stanowi istotny krok w kierunku opracowania podstaw technologicznych obróbki elektroerozyjnej w gazie w kinematyce frezowania z zewnętrznym chłodzeniem przedmiotu obrabianego.

Opiniowana rozprawa realizowana była w oparciu o zróżnicowane nowoczesne techniki badawcze, aparaturę i urządzenia technologiczne oraz stanowi istotne osiągnięcie Doktorantki w obszarze badań nad obróbką elektroerozyjną w gazie w kinematyce frezowania. Fragmenty uzyskanych wyników Autorka prezentowała na konferencjach międzynarodowych i krajowych, gdzie zostały pozytywnie ocenione.

Przeprowadzone oryginalne badania doświadczalne miały charakter interdyscyplinarny i dają naukowe podstawy do rozwoju technologii obróbki elektroerozyjnej w gazie w kinematyce frezowania stopu Inconel 625 i tytanu Grade 2.

4. Uwagi do pracy

Generalnie, praca napisana jest na bardzo dobrym poziomie z zastosowaniem właściwej terminologii. Nie mniej jednak Autorka nie uniknęła błędów językowych, edytorskich i stylistycznych np.:

- str. 11, „ Kratery, które powstają na powierzchni elektrody.....odznaczają się większą głębokością i charakterystycznymi *wypustkami*” – obserwowane są wypłytki,
- str. 25, „Podczas tej obróbki w kinematyce frezowania, szybko poruszającą się elektrodą roboczą, tlen tworzy atmosferę gazu w strefie obróbki.” – styl.
- str. 28, „Obliczone temperatury chmury *elektronów elektronów*....” – powtórzenie,
- str. 30, „...ablacji w tlenie z udziałem *dotykowych gazów*..” - dodatkowych
- str. 32, „... dzięki *cieńszej szczelinie międzyelektrodowej*” – mniejszej grubości szczeliny
- strona 38, „...roztworze kwasu azotowego V w temperaturze..- co oznacza V
- w niektórych miejscach w pracy stosowny jest odmienny opis tego samego parametru V_{śr}- średnia prędkość liniowa lub V- średnia prędkość liniowa lub V_{śr} – średnia prędkość elektrody,
- str. 42, „Proces przygotowania *szlifów metalograficznych*...” – zgładów metalograficznych.
- Utrudnione porównanie wyników badań w wyniku zmiany jednostek np. mm³/min na mm³/s; tabela 12 , rys. 37,
- str. 68, „Porównując średnie wartości *wysokości* i szerokości rowków” – głębokości rowków
- str. 75, Tabela 25 – wartość obliczonego odchylenia standardowego dla w% jest większa od wartości średniej.

Pewien niedosyt budzi fakt braku analizy przebiegów napięcia i natężenia prądu elektrycznego w warunkach obróbki elektroerozyjnej, które mogłyby pozwolić na ocenę stabilności wyładowań elektrycznych dla przyjętych zmiennych niezależnych.

W rozprawie nie przedstawiono wyznaczonych równań regresji opisujących wpływ badanych zmiennych niezależnych na parametry wyjściowe ograniczając się do graficznej prezentacji wyznaczonych zależności. Brak przedstawienia wartości współczynnika korelacji R oraz wartości funkcji Fishera i wartości ilorazu F/F_{kr} dla przyjętego poziomu istotności α utrudnia ocenę dopasowania wyznaczonych funkcji do wyników badań doświadczalnych i adekwatności opracowanych modeli.

Poniżej wymieniono uwagi o charakterze dyskusyjnym z prośbą do Autorki rozprawy o ustosunkowanie się:

1. Zgodnie z danymi zawartymi w Tabeli 8, badania właściwe prowadzone były dla odmiennych biegunowości elektrody roboczej i materiału w przypadku Inconel 625 i tytanu Grade2. Proszę o uzasadnienie zastosowania odmiennych biegunowości.
2. W pracy nie przedstawiono wyznaczonych równań regresji opisujących wpływ badanych zmiennych niezależnych na parametry wyjściowe ograniczając się do graficznej prezentacji wyznaczonych zależności. Na jakim poziomie kształtowała się wartość współczynnika korelacji R , oraz wartość F/F_{kr} dla przyjętego poziomu istotności. Czy przeprowadzono analizę reszt dla wyznaczonych funkcji regresji?
3. W pracy nie przedstawiono charakterystyk przebiegów napięcia i natężenia prądu elektrycznego w warunkach obróbki elektroerozyjnej. Czy badano stabilność przebiegów napięcia i natężenia prądu dla przyjętych wartości zmiennych niezależnych?
4. W prowadzonych badaniach doświadczalnych procesu frezowania elektroerozyjnego w gazie nie uwzględniono ruchu obrotowego elektrody roboczej, co wydaje się istotne z punktu widzenia równomiernego zużycia elektrody roboczej i dokładności wymiarowo kształtowej wykonanej geometrii. Proszę o dyskusję tego zagadnienia.

Niezależnie od wymienionych uprzednio uwag krytycznych nie umniejszają one pozytywnej oceny merytorycznej opiniowanej rozprawy doktorskiej.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Uważam, że recenzowana rozprawa prezentuje wysoki poziom merytoryczny i zawiera wiele elementów nowości i oryginalności. Przedstawione rezultaty mają zarówno istotne znaczenie naukowe jak i użytkowe i stanowią ważny wkład w rozwój wiedzy dotyczącej technologii obróbki elektroerozyjnej w gazie. Ponadto stwierdzam, że Autorka wykazała się szeroką interdyscyplinarną wiedzą, umiejętnością planowania i realizacji badań naukowych oraz umiejętnością oceny uzyskanych wyników.

Poziom naukowy analizy zjawisk fizycznych występujących podczas obróbki elektroerozyjnej w gazie oraz interpretacja wyników badań doświadczalnych jest bardzo wysoki. Złożoność problematyki badawczej wynika z trudności w opisie obiektu badań. Przeprowadzone badania obejmują zarówno analizę wpływu zaproponowanego chłodzenia przedmiotu obrabianego w trakcie procesu jak również parametrów obróbki determinujących energię wyładowania elektrycznego, co w istotny sposób wpływa na zmianę przebiegu procesu usuwania materiału i kształtowania cech warstwy wierzchniej w stosunku do dotychczas opisanych w literaturze. Przedstawiony w rozprawie szeroki zakres przeprowadzonych prac badawczych wraz z interpretacją wyników badań stanowi istotny i oryginalny wkład w poznanie i rozwój technologii obróbki elektroerozyjnej w gazie o kinematyce frezowania. Dlatego uważam, że recenzowana rozprawa zasługuje na **wyróżnienie**.

Uwzględniając powyższe stwierdzam, że rozprawa doktorska opracowana przez Panią mgr. inż. Agnieszkę Żyrę pt. „Wpływ zewnętrznego chłodzenia przedmiotu obrabianego na efektywność obróbki elektroerozyjnej w gazie” spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa i może być dopuszczona do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

