

Recenzja pracy doktorskiej pt.

**Analiza wpływu parametrów obróbki EDM na pokrycia
aluminidkowe uzyskiwane różnymi metodami w otworach
chłodzących części turbiny wysokiego ciśnienia**

Autor pracy: mgr inż. Marcin Trajer

Promotor: dr hab. inż. Jerzy Robert Sobiecki, prof. uczelni

Promotor pomocniczy: dr inż. Magdalena Machno

*Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącej Rady Naukowej
Dyscypliny Inżynieria Materiałowa prof. dra hab. inż. Małgorzaty Lewandowskiej,
z dnia 24 kwietnia 2023 roku.*

1 Charakterystyka pracy

Obróbka elektroerozyjna (EDM) należy do jednej z najbardziej rozpowszechnionych i najczęściej wykorzystywanych niekonwencjonalnych metod wytwarzania. W procesie tym naddatek jest usuwany z przedmiotu obrabianego w wyniku zjawisk towarzyszącym wyładowaniom elektrycznym zachodzącym w obszarze pomiędzy dwoma elektrodami podłączonymi do generatora impulsów napięcia elektrycznego. Jedną z elektrod jest narzędzie (tzw. elektroda robocza), drugą przedmiot obrabiany, a obszar między nimi jest wypełniony dielektrykiem ciekłym lub gazowym. Oparty na wyładowaniach elektrycznych mechanizm usuwania materiału powoduje, że EDM umożliwia kształtowanie szerokiej grupy materiałów przewodzących prąd elektryczny niezależnie od ich składu chemicznego i własności mechanicznych. Technologia ta jest racjonalną alternatywą przy kształtowaniu elementów wykonanych z materiałów trudnoobrabialnych klasycznymi metodami, tj.: utwardzonej stali, węglików, stopów o wysokiej wytrzymałości, kompozytów na osnowie metalicznej czy materiałów ceramicznych przewodzących prąd elektryczny. Obróbka elektroerozyjna umożliwia wykonywanie z tych materiałów przedmiotów o skomplikowanych, krzywoliniowych powierzchniach, elementów cienkościennych czy smukłych otworów o średnicach < 1 mm. Proces ten jest powszechnie stosowany

praktycznie we wszystkich gałęziach przemysłu, a typowe przykłady to m.in. produkcja matryc kuźniczych, form wtryskowych oraz części silników lotniczych.

Zastosowanie obróbki elektroerozyjnej w przemyśle związane jest z wykorzystaniem różnorodnych odmian kinematycznych, a w szczególności: drążenia wgłębnego, wycinania drutem, wiercenia elektroerozyjnego oraz poprzez zastosowanie elektrody uniwersalnej. Bez względu na analizowany wariant technologiczny mechanizm usuwania materiału w EDM jest bardzo złożony, a efektywność obróbki mierzona jest wskaźnikami technologicznymi tj. wydajność, zużycie elektrody roboczej oraz właściwości technologicznej warstwy wierzchniej. Grupa czynników wpływających na te wskaźniki obejmuje: (1) parametry elektryczne i czasowe impulsów elektrycznych, (2) skład i parametry fizyczne oraz hydrodynamikę dielektryka, (3) konstrukcję obrabiarki, a w szczególności algorytmy regulacji grubości szczeliny międzyelektrodowej oraz (4) właściwości materiału przedmiotu i elektrody roboczej.

Opiniowana praca dotyczy dwóch obszarów związanych z technologią wytwarzania łopatek turbin silników lotniczych tj: (1) zagadnień związanych z doбором odpowiednich warunków obróbki elektroerozyjnej zapewniających efektywną realizację procesu wykonywania otworów chłodzących oraz (2) wpływu właściwości technologicznej warstwy wierzchniej po EDM na trwałość aluminiokowych powłok ochronnych.

Dysertacja składa się z trzynastu rozdziałów, z czego dziesięć bezpośrednio dotyczy zagadnień merytorycznych tj.:

- rozdział 2, czyli wstęp będący krótkim wprowadzeniem wskazującym na zasadność podejmowanej w pracy tematyki badawczej,
- rozdział 3 zawierający rys historyczny rozwoju silników odrzutowych oraz analizę literatury dotyczącej: obróbki elektroerozyjnej, wybranych zagadnień dotyczących degradacji materiału oraz wytwarzania ochronnych powłok aluminiokowych,
- rozdział 4 obejmuje wnioski z analizy literatury,
- rozdział 5 przedstawia cel i zakres prac badawczych,
- rozdział 6 poświęcony jest opracowaniu technologii drążenia elektroerozyjnego otworów,
- rozdziały 7 i 8 dotyczą prac badawczych nad właściwościami wytworzonych powłok ochronnych,
- rozdział 9 zawiera podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych,
- rozdział 10 wskazuje kierunki dalszych badań.

Dodatkowo praca zawiera streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz podstawowych oznaczeń i ważniejszych skrótów wykorzystanych w rozprawie (rozdział 1), informacje o publikacjach Autora (rozdział 11) zestawienie bibliograficzne (rozdział 12) oraz spis rysunków wykorzystanych w pracy (rozdział 13).

2 Ocena pracy

2.1 Ocena wyboru tematyki

Opiniowana dysertacja została zrealizowana w ramach programu *Doktorat Wdrożeniowy*, czyli programu Ministerstwa Edukacji i Nauki wspierającego współpracę podmiotów systemu szkolnictwa wyższego z otoczeniem społeczno-gospodarczym i polegającego na kształceniu doktorantów we współpracy z zatrudniającymi ich przedsiębiorcami lub innymi podmiotami. Efektem kształcenia w Szkole Doktorskiej w ramach doktoratu wdrożeniowego ma być implementacja w podmiocie współpracującym wyników działalności naukowej prowadzonej przez Doktoranta.

Praca realizowana była przy współpracy z *Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa*, a jej tematyka dotyczy technologii i właściwości eksploatacyjnych elementów chłodzonych turbin silników turbodrzutowych. Tematyka ta wpisuje się w prace konstrukcyjne i wdrożeniowe nad nowym silnikiem turbodrzutowym firmy General Electric Aerospace, które prowadzone są w europejskich centrach badawczych tj.: w Polsce, Niemczech, Czechach, Włoszech oraz Turcji. W ramach projektu rozwojowego realizowanego przez *Zespół Laboratorium Zaawansowanych Technologii Produkcyjnych GE Company Polska* Pan mgr inż. Marcin Trajer skoncentrował się na zagadnieniach związanych z technologią elektroerozyjnego wykonywania otworów chłodzących o małych średnicach ≤ 1 mm oraz jej wpływie na właściwości powłok aluminiowych.

Sprawność cyklu pracy silnika odrzutowego wzrasta z temperaturą obiegu, dlatego też wybrane części współczesnych silników odrzutowych często pracują w temperaturze powyżej 1500° C, co wymaga opracowania rozwiązań zapewniających ich trwałość i niezawodność. Jednym z kierunków rozwoju w tym obszarze jest zastosowanie systemów chłodzenia oraz poprawa własności powłok ochronnych. I to właśnie tych zagadnień dotyczą prowadzone przez Doktoranta prace badawcze.

Technologia wykonywania małych otworów chłodzących w częściach turbin silników lotniczych jest od wielu lat rozwijana przez zagraniczne ośrodki badawcze. Jest to jedna z kluczowych technologii pozwalających zdobyć przewagę konkurencyjną w sektorze producentów

silników lotniczych, dlatego też wiedza na ten temat nie jest upowszechniana w czasopismach naukowych, a *know-how* w tym zakresie jest objęte ograniczeniami eksportowymi USA. Wymusiło to na zespołach europejskich podjęcie prac badawczych zmierzających do opracowania wytycznych projektowych dla tej technologii. Warto również podkreślić, że obiekt badawczy, jakim jest proces obróbki elektroerozyjnej, jest bardzo złożony a uzyskanie wiedzy technologicznej, w tym powiązanie właściwości technologicznej warstwy wierzchniej z warunkami obróbki, wymaga podjęcia szeregu analiz teoretycznych i badań empirycznych.

Wymienione powyżej przesłanki jednoznacznie uzasadniają wybór tej tematyki i wskazują na jej wysoki potencjał badawczy i aplikacyjny.

2.2 Ocena merytoryczna

Dysertacja dotyczy dwóch obszarów tematycznych związanych z technologią obróbki elektroerozyjnej oraz technologią nakładania aluminiokowych powłok ochronnych. Zgodna z tym jest struktura pracy, w której, poza analizą literatury, można wyodrębnić dwie oddzielne części dotyczące wymienionych zagadnień.

W ramach analizy literatury przedstawiono rys historyczny rozwoju silników turbodrzutowych oraz poruszono wszystkie istotne dla tematyki badawczej zagadnienia, i **tą część pracy można by uznać generalnie za poprawną merytorycznie (ale nie redakcyjnie, do czego odniosę się w dalszej części recenzji)**. Wątpliwości budzi jednak stosowana przez Autora terminologia dotycząca badanych wariantów kinematycznych EDM, ponieważ zgodnie z moją wiedzą i informacjami przedstawionymi w pracy, przeprowadzone badania dotyczyły procesu wiercenia elektroerozyjnego, czyli wariantu z obracającą się rurką elektrodą roboczą, a nie jak to błędnie nazwano w paragrafie 3.2.1 drążenia elektroerozyjnego. Drugim badanym wariantem kinematycznym EDM było frezowanie elektroerozyjne, dla którego kluczowym zagadnieniem jest opracowanie odpowiednich algorytmów kompensacji zużycia elektrody roboczej. Niestety, zagadnienie to nie zostało szerzej omówione w ramach analizy literatury.

Sformułowany przez Autora cel pracy ma charakter interdyscyplinarny i koncentruje się na zagadnieniach z obszaru inżynierii mechanicznej i materiałowej. Pierwsze z rozważanych w pracy zagadnień dotyczy opracowania technologii obróbki elektroerozyjnej otworów chłodzących, natomiast prace z zakresu inżynierii materiałowej koncentrują się na możliwościach wykonania i analizie właściwości aluminiokowych powłok ochronnych osadzanych na powierzchniach po EDM. Na podstawie przedstawionego paragrafie 5.1 zakresu badań **nie można jednoznacznie określić, jaki był dokładnie zakres przeprowadzonych w ramach doktoratu prac**

badawczych, ponieważ przedstawione informacje dotyczą projektu rozwojowego GE Company Polska, a sam Autor wymieniając zadania badawcze i rozwojowe stwierdza, że *wszystkie te elementy rozwijane są przez zespół Centrum Zaawansowanych Technologii Produkcyjnych, który działa w ramach biura EDC*. Odwołania do wyników pracy zespołu znajdują się też w innych miejscach pracy, np. na stronie 78 (*W celu zapewnienia spójności zapisów zespół przyjął następującą nomenklaturę (...)*), na stronie 81 (*Zespół przyjął następujące kryteria(...)*). Jak wcześniej wspomniano, doktorat był realizowany w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy i zrozumiałym jest, że **przedstawione badania są pewnym wycinkiem i wpisują się w prace rozwojowe firmy GE, jednak Doktorant nie wyodrębnił jednoznacznie jaka część pracy zbiorowej była przez niego realizowana samodzielnie**.

Prace badawcze dotyczące technologii obróbki elektroerozyjnej otworów chłodzących objęły zagadnienia związane z: (1) efektywnością przepłukiwania szczeliny międzyelektrodowej, (2) wpływem algorytmów regulacji szczeliny międzyelektrodowej na stabilność procesu drażnienia, (3) wpływem energii wyładowania, (4) wpływem właściwości materiału obrabianego oraz (5) wpływem jakości zastosowanych elektrod na efektywność badanego procesu. **Analizowane w pracy czynniki wpływające na wskaźniki badanego procesu zostały zidentyfikowane poprawnie, a wykorzystane metody i narzędzia badawcze są adekwatne do wyjaśnienia postawionego problemu badawczego**. Niestety, w mojej ocenie, **przedstawiona dokumentacja całego procesu badawczego dotyczącego opracowania technologii obróbki elektroerozyjnej budzi ogromny niedosyt**, co utrudnia jednoznaczną ocenę znaczenia uzyskanych przez Doktoranta wyników. W odniesieniu do poszczególnych zasadniczych zagadnień dotyczących procesu EDM chciałbym zwrócić uwagę na następujące aspekty:

- Z informacji przedstawionych w pracy nie wynika w jaki sposób zostały zaplanowane prace eksperymentalne. Autor w paragrafie 6, na str. 81-82 wspomina, że **analizie poddano aż 8 parametrów procesu drażnienia elektroerozyjnego, jednak nie wiadomo czy badania zostały przeprowadzone na podstawie eksperymentu planowanego oraz jakie plany badawcze wykorzystano** (jedno- czy wieloczynnikowe). Na podstawie zawartych w pracy zależności oraz prowadzonej dyskusji można jedynie wnioskować, że eksperymenty w zdecydowanej większości były oparte o plany jednoczynnikowe i nie uwzględniono interakcji wynikających z równoczesnej zmiany więcej niż jednego parametru procesu, co w przypadku tak złożonego procesu jak EDM jest zbyt daleko idącym uproszczeniem.

- Badany proces obróbki elektroerozyjnej ma charakter losowy, a analiza w dużym stopniu została oparta na dyskusji wyników przedstawionych w formie wykresów skrzynkowych wskazujących na duży rozrzut danych. **Nie przedstawiono natomiast metodyki oraz analiz potwierdzających statystyczną istotność różnic pomiędzy porównywanymi populacjami oraz brak jest informacji o liczbie wykonywanych powtórzeń.**
- Jednym z kluczowych aspektów projektowania technologii EDM jest zapewnienie skutecznego przepłukiwania strefy obróbki z produktów erozji. **Pozytywnie więc oceniam podjęcie przez Autora prac eksperymentalnych i analiz numerycznych związanych z hydrodynamiką przepływu dielektryka.** Warto zwłaszcza podkreślić analizy związane czynnikami wpływającymi na wydatek przepływu (tj. wpływ długości czy kształtu oraz struktury geometrycznej kanału wewnętrznego elektrody, zmiana warunków hydrodynamicznych wraz z głębokością wiercenia). **Doktorant podjął się również opracowania płaskiego modelu numerycznego przepływu i nie jest to, jak zostało przedstawione w pracy, model procesu elektroerozyjnego.** Opis modelu ogranicza się jedynie do informacji na temat geometrii oraz przyjętych warunków brzegowych. **Nie przedstawiono natomiast modelu fizycznego czy matematycznego, które były podstawą opisu modelowanych zjawisk.** Jako interesującą należy ocenić koncepcję analizy przepływu drobin materiału w strefie obróbki, jednak również w tym przypadku Autor nie uzasadnił czy i w jaki sposób ilość drobin jest skorelowana z rzeczywistym procesem EDM. Duże zdziwienie budzi także założenie na użytek modelu chropowatości powierzchni elektrody i przedmiotu rzędu 10^{-6} i 10^{-8} mm. **Powyższe uwagi nie dają więc podstaw do oceny poprawności i przydatności przedstawionego w pracy modelu numerycznego.**
- Jak wynika z przedstawionych w paragrafach 6.4 analiz, jednym z podstawowych czynników wpływających na efektywność badanego procesu są nastawy regulatora szczeliny międzyelektrodowej. W mojej ocenie Doktorant błędnie określa ten parametr jako posuw F , ponieważ w obróbce elektroerozyjnej posuw elektrody roboczej nie jest parametrem nastawnym procesu tylko wynika z charakterystyki pracy oraz nastaw regulatora oraz warunków panujących w szczelinie międzyelektrodowej. Ma to także ścisły związek z nastawami pojemności (paragraf 6.7) układu zasilającego. **Doktorant nie podjął się jednak bardzo istotnych dla podejmowanego problemu badawczego pogłębionych analiz w tym zakresie oraz nie przedstawił w pracy informacji dotyczących typu, budowy i charakterystyki pracy zastosowanego w trakcie badań generatora elektroerozyjnego.**

- **Doktorant słusznie zauważył i wykazał, że w przypadku produkcji seryjnej duży wpływ na stabilność procesu może mieć jakość wykonania elektrod** (dotyczy to różnic pomiędzy elektrodami dostarczanymi przez różnych dostawców czy nawet w obrębie jednej partii).
- Przedstawiona bardzo ogólnikowo w paragrafie 6.9 technologia wykonywania otworów kształtowych oparta jest na kinematyce wierszowania, dla której istotnym elementem jest prawidłowa kompensacja zużycia elektrody roboczej. Niestety, **Doktorant nie wspomina o tym w jaki sposób rozwiązany został problem wpływu zażycia elektrody na geometrię wykonywanych otworów**. Dodatkowo, na podstawie zależności technologicznych przedstawionych na rysunkach 6-47 i 6-49 **nie można wnioskować o wpływie parametrów procesu ponieważ dane na osiach X zostały ukryte**. W pracy nie przedstawiono analiz ilościowych dotyczących geometrii uzyskanych otworów kształtowych, a czytelnik musi się jedynie zadowolić jakościowym stwierdzeniem, że *wykorzystanie zdobytych doświadczeń do wykonania docelowego kształtu otworu chłodzącego pozwoliło na uzyskanie geometrii spełniającej wymagania rysunkowe*.
- **Zamieszczone w paragrafie 6.10 wnioski** dotyczące prac badawczych nad technologią elektroerozyjną zawierają bardzo ogólne informacje dotyczące stanu badań na procesem EDM natomiast **w żadnym stopniu nie odnoszą się do uzyskanych przez Doktoranta wyników i przeprowadzonych analiz**.

Drugim obszarem badawczym przedstawionym w Dysertacji są badania właściwości powłok aluminiowych wytworzonych na próbkach ze stopu Inconel 718, w których wykonane zostały otwory o średnicach 0.4 mm, 0.5 mm oraz 1 mm, przy czym otwory o średnicy 1 mm zostały wykonane w kinematyce frezowania elektroerozyjnego. Badania zostały przeprowadzone w dwóch etapach. Celem badań wstępnych było potwierdzenie możliwości wykonania powłok o założonych właściwościach metodą aluminowania dyfuzyjnego bezkontaktowo-gazową (VPA). Drugi etap koncentrował się na określeniu wpływu technologii wykonania oraz geometrii otworów na skład chemiczny i odporność powłoki ochronnej, a zakres tych badań został dodatkowo rozszerzony o próbki ze stopu Rene N515 oraz nasazenie powłok metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej (CDV). Do scharakteryzowania właściwości wytworzonych powłok wykorzystano adekwatne metody i narzędzia badawcze tj. mikroskopie elektronową, dyfraktometrię rentgenowską, mikroskopie optyczną oraz test zarysowania. W ramach badań zasadniczych scharakteryzowano otwory wykonane dwoma różnymi zestawami parametrów tj. przy energii wyładowania 200 J i 410 J, a wnioskowanie o zmianach właściwości

powłoki oparto na analizie ilościowej (czyli zmianach udziału masowego glinu, niklu oraz tlenu) oraz ocenie jakościowej mikrostruktury po 120 i 264 godzinach utleniania przyjmując jako odniesienie powłokę nieutlenioną. Analiza uzyskanych wyników doprowadziła Doktoranta do wniosków, że właściwości i stabilność uzyskanych powłok zależą od zastosowanej metody nanoszenia oraz są skorelowane z parametrami obróbki elektroerozyjnej oraz głębokością otworów chłodzących. **Ta część dysertacji jest wystarczająco udokumentowana i generalnie poprawna metodycznie oraz merytorycznie, jednak w aspekcie tematu pracy chciałbym zaznaczyć, że zbadano wpływ tylko jednego parametru EDM, czyli energii wyładowania.** Warto też podkreślić, że **Doktorant nie wyjaśnia co leży u podstaw uzyskanych różnic pomiędzy badanymi populacjami otworów.** W aspekcie bardzo dużej liczby przebadanych próbek i otworów, **pewien niedosyt budzi też brak analiz potwierdzających statystyczną istotność różnic pomiędzy właściwościami powłok ochronnych dla otworów wykonanych odmiennymi parametrami EDM.** Nie udokumentowano również wyników badań adhezji warstwy, które Autor wymienia w paragrafie 7.1 wśród zastosowanych metod i narzędzi badawczych.

2.3 Ocena strony formalnej rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa napisana została w języku polskim i wraz z wykazami ważniejszych skrótów i rysunków, bibliografią oraz streszczeniami w języku polskim i angielskim obejmuje 169 stron. Autor podczas przygotowania rozprawy skorzystał z bazy obejmującej 96 pozycji bibliograficznych. Rozważania są udokumentowane wieloma schematami, zdjęciami, tabelami oraz wykresami. Praca ma generalnie poprawną strukturę, jednak **redakcja dysertacji jest na bardzo niskim poziomie, a Doktorant w najmniejszym choćby stopniu nie zachował staranności edytorskiej.** Praca charakteryzuje się bardzo niestarannie opracowaną szatą graficzną, zawiera szereg błędów edytorskich i stylistycznych, których ze względu na ograniczenia objętościowe nie sposób wszystkich wymienić w niniejszej recenzji. Poniżej ograniczę się do wskazania tylko najbardziej rażących przykładów, uzasadniających moją bardzo krytyczną ocenę redakcji pracy:

- praca dotyczy w szczególności procesu obróbki elektroerozyjnej, a przymiotnik *elektroerozyjna* powinien być pisany razem (również sam Autor podaje tak wymieniając podstawowe skróty i oznaczenia stosowane w pracy). Niestety, nie dochowano staranności w tym zakresie i wielokrotnie w pracy popełniany błąd i przymiotnik charakteryzujący rodzaj badanego procesu pisany jest oddzielnie tj. *elektro erozyjna* (skrajnymi przykładami są np. tytuły paragrafów 3.2.1, 3.2.2, 4.1),

- w pracy nie wykazano konsekwencji i staranności w stosowaniu oznaczeń (przykładem może być stosowanie dość dowolnie i niekonsekwentnie indeksów dolnych jako oznaczenie czasu impulsu i czasu przerwy (T_{on} i T_{off}),
- w rozdziale dotyczącym analizy literatury niektóre rysunki są wstawione w środku zdania (przykłady: Rys. 3-3, Rys. 3-4, Rys. 3-25),
- praca napisana jest w języku polskim, natomiast zdecydowana większość rysunków, schematów i wykresów opisana jest w języku angielskim,
- część rysunków, schematów i wykresów jest bardzo niskiej jakości a ich opisy są bardzo nieczytelne (przykłady: Rys. 3-2, Rys. 3-61, Rys. 3-63, Rys. 3-64, Rys. 3-63, Rys. 5-3, Rys. 5-4, Rys. 6-26),
- brak jednostek, brak opisów osi lub w ogóle brak jakichkolwiek osi na wykresach (skrajne przykłady to charakterystyki przedstawione na Rys. 6-4 i Rys. 6-25 gdzie na czarnym tle są jakieś kolorowe linie, których znaczenia można się tylko domyślać),
- zgodnie z zasadami obowiązującymi w języku polskim dotyczących zapisu oznaczeń wartości fizycznych i matematycznych między wartością liczbową a literowym oznaczeniem miary czasami stawiamy spację. Doktorant w tym zakresie stosuje jednak całkowita dowolność tzn. czasami spację wstawia a czasami zupełnie ignoruje tę regułę.

Uwzględniając powyższe chciałbym podkreślić, że bardzo niski poziom redakcji pracy, szereg błędów edytorskich i stylistycznych oraz niska czytelność wykresów istotnie utrudniają analizę merytoryczną i jednoznaczną ocenę przedstawionego materiału badawczego.

3 Wniosek końcowy

Praca doktorska mgra inż. Marcina Trajera pt.: *Analiza wpływu parametrów obróbki EDM na pokrycia aluminiakowe uzyskiwane różnymi metodami w otworach chłodzących części turbiny wysokiego ciśnienia* ma charakter eksperymentalny i jest zorientowana na wdrożenie wyników w praktyce przemysłowej, a jej tematyka mieści się w dyscyplinach inżynieria mechaniczna oraz inżynieria materiałowa. **Doktorant podjął się kompleksowego rozwiązania bardzo złożonego i interdyscyplinarnego problemu badawczego, a poszczególne zagadnienia poruszane w pracy mogłyby być podstawą realizacji kilku innych prac doktorskich.** Dogłębna analiza materiału przedstawionego w dysertacji prowadzi jednak do

wniosku, że Doktorant nie potwierdził w tym opracowaniu potencjału naukowego i wdrożeniowego wynikającego z podjętej tematyki badawczej. **W mojej opinii na tym etapie nie ma podstaw do pozytywnej oceny pracy. Jak uzasadniono powyżej, przedstawiona w pracy dokumentacja przeprowadzonych badań jest niepełna, niestaranna lub niepoprawna metodycznie i nie daje możliwości jednoznacznej oceny czy cel pracy został osiągnięty.** Uwagi te w szczególności dotyczą bardzo niskiego poziomu dokumentacji prac badawczych dotyczących opracowania technologii drażenia elektroerozyjnego, które stanowią kluczową część podjętych przez Doktoranta badań. Dodatkowo istotnym czynnikiem wpływającym na moją negatywną ocenę jest bardzo niski, wręcz nieakceptowalny jak dla pracy będącej podstawą awansu naukowego, poziom redakcji. Jednocześnie, uwzględniając wagę i znaczenie tematyki, bardzo obszerny i interdyscyplinarny zakres przeprowadzonych prac badawczych oraz specyfikę pracy doktorskiej realizowanej w ramach programu *Doktorat Wdrożeniowy* uważam, że Doktorant powinien dostać możliwość uzupełnienia dysertacji w odniesieniu do wskazanych w recenzji uwag krytycznych, dlatego też wnioskuję o odesłanie pracy doktorskiej mgr inż. Marcina Trajera do poprawy.

