

prof. dr hab. inż. Sebastian Skoczypiec  
Katedra Inżynierii i Automatyizacji Produkcji  
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

25 maja 2023 r.

Recenzja pracy doktorskiej pt.

**Wpływ wielkości ziarna elektrod grafitowych  
na wskaźniki technologiczne i stan warstwy wierzchniej  
po obróbce elektroerozyjnej**

Autor pracy: mgr inż. Rafał Nowicki

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

*Podstawą opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Warszawskiej prof. dra hab. inż. Tomasza Chmielewskiego, nr MT.521.1.2023, z dnia 19 kwietnia 2023 roku.*

## 1 Charakterystyka pracy

Obróbka elektroerozyjna (EDM) należy do grupy niekonwencjonalnych procesów wytwarzania. W procesie tym naddatek jest usuwany z przedmiotu obrabianego w wyniku zjawisk towarzyszącym wyładowaniom elektrycznym, które zachodzą 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 jest racjonalną alternatywą przy kształtowaniu elementów wykonanych z materiałów trudnoobrabialnych klasycznymi metodami, tj.: utwardzonej stali, węglików, stopów o wysokiej wytrzymałości, kompozytów na podstawie metalicznej czy materiałów ceramicznych przewodzących prąd elektryczny. Obróbka elektroerozyjna umożliwia wykonywanie z tych materiałów przedmiotów o skomplikowanych, krzywoliniowych powierzchniach z relatywnie wysoką dokładnością, co powoduje że powszechnie jest stosowana np. do wytwarzania form wtryskowych czy matryc.

Podstawowymi wskaźnikami technologicznymi kształtowania elektroerozyjnego jest wydajność obróbki, zużycie elektrody 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 między-elektrodowej oraz (4) właściwości materiału przedmiotu i elektrody roboczej. I to ostatniej grupy czynników przede wszystkim dotyczy opiniowana praca, która poświęcona jest analizie wpływu morfologii i właściwości stosowanych w EDM elektrod grafitowych na wskaźniki technologiczne oraz stan warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej.

Dysertacja składa się z dziesięciu rozdziałów obejmujących:

- rozdział 1, czyli jednostronicowy wstęp będący krótkim wprowadzeniem wskazującym na zasadność podejmowanej w pracy tematyki badawczej;
- rozdział 2 obejmujący analizę literatury dotyczącej badanego procesu, mechanizmów fizycznych erozji elektrycznej i usuwania materiału z obu elektrod, roli dielektryka w badanym procesie, stosowanych materiałów elektrodowych i ich wpływu na przebieg obróbki (ze szczególnym uwzględnieniem elektrod grafitowych) oraz właściwości technologicznej warstwy wierzchniej po EDM;
- rozdział 3 zawierający uzasadnienie podjęcia problemu badawczego, zdefiniowanie celu i zakresu pracy oraz omówienie przedmiotu badań oraz przyjętej metodyki eksperymentu;
- rozdział 4, poświęcony szczegółowemu omówieniu zastosowanej przez Doktoranta aparatury badawczej oraz metod pomiarowych i statystycznych. W tym rozdziale przedstawiono i omówiono wyniki badań rozpoznawczych, co było podstawą do doboru badanego zakresu czynników wejściowych i przygotowania eksperymentu planowanego;
- rozdziały od 5 do 9, które zawierają prezentację, analizę i dyskusję wyników badań w odniesieniu do: wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych na wskaźniki technologiczne oraz wybrane właściwości technologicznej warstwy wierzchniej (tj. strukturę geometryczną powierzchni, skład chemiczny, udziału nośny powierzchni oraz grubość strefy wpływu ciepła);
- rozdział 10, czyli podsumowanie przeprowadzonych prac, wnioski o charakterze poznawczym i użytkowym oraz wskazanie kierunków dalszych badań.

Dodatkowo praca zawiera wykaz oznaczeń i ważniejszych skrótów wykorzystanych w rozprawie, jednostronicowe streszczenia w języku polskim i angielskim oraz zestawienie bibliograficzne.

## 2 Ocena pracy

### 2.1 Ocena wyboru tematyki

Obróbka elektroerozyjna należy do jednej z najbardziej rozpowszechnionych i najczęściej wykorzystywanych niekonwencjonalnych metod wytwarzania. Niewątpliwą zaletą procesu EDM jest możliwość kształtowania szerokiej grupy materiałów przewodzących prąd elektryczny niezależnie od ich składu chemicznego i własności mechanicznych. Obróbka elektroerozyjna jest powszechnie stosowana praktycznie we wszystkich gałęziach przemysłu, a typowe przykłady zastosowania to m.in. produkcja matryc kuźniczych, form wtryskowych oraz części silników lotniczych. Obróbka elektroerozyjna jest procesem bardzo złożonym, a jej efektywność zależy od czynników związanych ze sposobem zasilania i regulacji szczeliny międzyelektrodowej, zastosowanym dielektrykiem, skutecznością przepłukiwania szczeliny międzyelektrodowej, materiałem obrabianym oraz zastosowanym materiałem elektrody roboczej.

Swoje badania naukowe Doktorant skoncentrował na analizie wpływu struktury i właściwości elektrod grafitowych na wskaźniki technologiczne i integralność warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej. Badania te zostały przeprowadzone dla różnych polaryzacji i wybranego zakresu zmienności parametrów stosowanych w procesie impulsów elektrycznych.

Przesłanki do podjęcia tematyki badawczej zostały trafnie przeanalizowane przez Doktoranta w paragrafie 3.1 pt. *Uzasadnienie podjęcia pracy*, a do najważniejszych z nich zaliczam:

- stale rosnący udział grafitu jako materiału, z którego wytwarza się elektrody robocze;
- dostępność wielu różnorodnych gatunków grafitu stosowanego na elektrody (różnice dotyczą struktury, ziarnistości, gęstości, porowatości);
- wynikający z atrakcyjności technologicznej, obszaru zastosowań przemysłowych oraz istniejących ograniczeń technologicznych nieustanny rozwój EDM;
- fakt, że zdecydowana większość publikacji naukowych dotyczących procesu EDM dotyczy analizy wpływu wybranych parametrów elektrycznych na przebieg i efektywność procesu, przyjmując materiał elektrody jako czynnik ustalony;
- koncentracja prac badawczych dotyczących właściwości elektrod grafitowych tylko na powiązaniu wielkości ziarna z dokładnością kształtowania (w pracach tych pomija się wpływ innych własności fizycznych materiału elektrodowego tj. porowatość czy przewodność, a prowadzone analizy nie uwzględniają wpływu materiału elektrody na integralność warstwy wierzchniej).

Wymienione powyżej przesłanki jednoznacznie uzasadniają potrzebę podjęcia badań na wpływem właściwości elektrod grafitowych na przebieg procesu EDM. Uważam, że **tematyka opiniowanej rozprawy jest aktualna i jest odpowiedzią na istniejącą lukę wiedzy o procesie obróbki elektroerozyjnej oraz ma wysoki potencjał naukowy i aplikacyjny.**

## 2.2 Ocena merytoryczna

Celem pracy było wyznaczenie wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych o wysokiej izotropowości oraz parametrów elektrycznych na wydajność objętościową drążenia elektroerozyjnego, względne zużycie elektrody roboczej oraz stan technologicznej warstwy wierzchniej. Zakres zrealizowanych prac badawczych objął:

- charakterystykę badanych materiałów elektrodowych tj. analizę jakościową na podstawie zdjęć SEM oraz wyznaczanie ich gęstości pozornej i porowatości,
- badania wstępne w celu wyznaczenia charakterystyk prądowo-napięciowych oraz ustalenia zakresu zmienności stabilnych parametrów obróbki,
- przeprowadzenie badań doświadczalnych wpływu właściwości fizycznych, wielkości ziarna elektrod grafitowych oraz parametrów elektrycznych i polaryzacji elektrod na wskaźniki technologiczne oraz stan technologicznej warstwy wierzchniej,
- analizę składu chemicznego powierzchni elektrod i przedmiotu po obróbce elektroerozyjnej,
- analizę właściwości tribologicznych oraz określenie charakterystyki defektów mikrostrukturalnych technologicznej warstwy wierzchniej,
- wyznaczenie, dla badanych materiałów elektrodowych i zastosowanej polaryzacji narzędzia, statystycznych modeli matematycznych opisujących związek pomiędzy parametrami elektrycznymi a wskaźnikami technologicznymi i parametrami charakteryzującymi stan technologicznej warstwy wierzchniej.

Badania doświadczalne przeprowadzono dla dwóch typów elektrod grafitowych firmy POCO tj. AF-5 oraz S-180 o wielkości ziarna odpowiednio  $1\ \mu m$  i  $10\ \mu m$ . Materiałem obrabianym był stop Hastelloy C-22, a obróbkę przeprowadzono w kinematyce drążenia swobodnego na obrabiarce elektroerozyjnej Form 2-LC ZNC firmy Charmilles wyposażonej w izoenergetyczny

impulsowy generator tranzystorowy oraz tor pomiarowy umożliwiającą rejestrację rzeczywistych przebiegów prądowo-napięciowych. Badania przeprowadzono zgodnie z zasadami teorii eksperymentu na podstawie opracowanych przez Doktoranta planów rotabilnych pięciopozomowych przyjmując jako czynniki wejściowe amplitudę natężenia prądu wyładowania, czas impulsu i czas przerwy. Jako wskaźniki technologiczne procesu przyjęto wydajność objętościową drążenia oraz względne zużycie elektrod roboczej. Chropowatość uzyskanych powierzchni scharakteryzowano w oparciu o pięć parametrów przestrzennych chropowatości tj.: średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia  $S_a$ , wysokość nierówności powierzchni według 10-ciu punktów  $S_z$ , całkowitą wysokość nierówności powierzchni  $S_t$ , gęstość wierzchołków nierówności powierzchni  $S_{ds}$ , wskaźnik względnego rozwinięcia powierzchni  $S_{dr}$  oraz wymiar fraktalny  $S_{fd}$ . Dokonano także analizy grubości warstwy przetopionej, a dla wybranych próbek przeanalizowano skład chemiczny oraz przeprowadzono analizę nośności powierzchni. Dyskusję wyników uzupełniają opracowane przez Doktoranta statystyczne modele matematyczne opisujące podstawowe charakterystyki technologiczne dla badanych wariantów procesu EDM.

W ocenie merytorycznej pracy na szczególne podkreślenie zasługują:

- odpowiednio dobrana metodyka oraz prawidłowo zaplanowany bardzo szeroki zakres przeprowadzonych badań;
- wykorzystanie trzech uzupełniających się technik badawczych tj. metody piknometrycznej, ważenia hydrostatycznego oraz porozymetrii rtęciowej do zbadania gęstości i porowatości stosowanych w badaniach typów grafitu;
- rzetelność i duża staranności w opracowaniu i prezentacji otrzymanych wyników;
- całościowe podejście do problemu uwzględniające wszystkie kluczowe aspekty związane z zastosowaniem technologii obróbki elektroerozyjnej tj. wskaźniki technologiczne, strukturę geometryczną, morfologię, grubość warstwy przetopionej oraz zmiany składu chemicznego technologicznej warstwy wierzchniej po EDM;
- przedstawienie spójnego, opartego na podstawach teoretycznych i wynikach eksperymentu, wyjaśnienia w jaki sposób wielkość ziarna elektrody grafitowej wpływa na zjawiska zachodzące w szczelinie międzyelektrodowej;
- szczegółowe, oparte na analizie mechanizmów fizycznych, wyjaśnienie w jaki sposób warunki i czynniki wejściowe procesu wpływają na analizowane wskaźniki technologiczne

i zmiany w warstwie wierzchniej materiału obrabianego (przedstawione przez Doktoranta rozważania koncentrują się nie tylko wokół odpowiedzi na pytanie *jak?*, ale również na odpowiedzi na pytanie *dłaczego?*).

Przedstawione w dysertacji badania i analizy **doprowadziły do poszerzenia wiedzy na temat technologii obróbki elektroerozyjnej, a w szczególności mechanizmu zużycia elektrod grafitowych oraz jego wpływu na przebieg procesu drażenia elektroerozyjnego, co stanowi autorskie osiągnięcie Doktoranta.** Otrzymane wyniki mogą być podstawą wyboru właściwej strategii obróbki, a wyznaczone charakterystyki technologiczne wykorzystane do optymalizacji i sterowania procesem.

Reasumując stwierdzam, że **rozprawa stanowi zamkniętą całość, a postawione przez mgra inż. Rafała Nowickiego cel badawczy został w pełni zrealizowany.** Doktorant wykazał się niezbędną przy rozwiązywaniu złożonych problemów badawczych interdyscyplinarną wiedzą z zakresu inżynierii mechanicznej, inżynierii materiałowej oraz elektrotechniki. Uwzględniając powyższe uzasadnienie pracę pod względem merytorycznym oceniam bardzo dobrze.

### 2.3 Ocena strony formalnej rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa napisana została w języku polskim i wraz z wykazem ważniejszych skrótów, bibliografią oraz streszczeniami w języku polskim i angielskim obejmują 196 stron. Autor podczas przygotowania rozprawy skorzystał z obszernej bazy obejmującej 251 pozycji bibliograficznych, a swoje rozważania udokumentował wieloma czytelnymi schematami, zdjęciami, tabelami oraz wykresami. Praca ma poprawną strukturę, a dobrany przez Autora materiał ilustracyjny jest obszerny i bardzo dobrze uzupełnia prowadzoną analizę literatury oraz dyskusję wyników. Na podkreślenie zasługuje również dochowana przez Doktoranta edytorska staranność oraz poprawność językowa. **Praca jest napisana poprawnym technicznie językiem i posiada niezwykle starannie opracowaną szatę graficzną oraz stojącą na wysokim poziomie dokumentację z badań własnych.** Autor nie ustrzegł się drobnych błędów edytorskich i stylistycznych, które jednak w niewielkim stopniu utrudniają analizę przedstawionego materiału oraz nie wpływają na wartość i wysoką ocenę merytoryczną pracy.

### 3 Uwagi krytyczne

Po wnikliwym przestudiowaniu pracy należy stwierdzić, że jest ona poprawna pod względem merytorycznym i metodycznym. Poniżej wymienione zostały uwagi krytyczne odnoszące się przede wszystkim do wybranych aspektów dysertacji:

- przedstawiona analiza literatury jest przeprowadzona poprawnie, jednak pewien niedosyt budzi brak syntetycznych wniosków podsumowujących aktualny stan wiedzy;
- pewnym problemem związanym z zastosowaniem grafitu jako materiału elektrodowego jest duże zapylenie podczas obróbki, co nie jest obojętne dla środowiska pracy i parku maszynowego. Niestety, problemy związane z wytwarzaniem elektrod grafitowych nie zostały uwzględnione w ramach analizy stanu zagadnienia;
- nie uzasadniono, że dla przyjętej w trakcie badań głębokości drażenia  $a_p = 0.5 \text{ mm}$  następuje stabilizacja procesu obróbki;
- w mojej opinii zamieszczona w paragrafie 4.2 charakterystyka impulsów elektrycznych powinna być uwzględniona w ramach analizy zagadnienia, a nie jako uzupełnienie opisu warunków i metodyki badawczej;
- pewne wątpliwości budzi zastosowanie przez Autora terminu *wynikowa warstwa wierzchnia*. W terminologii związanej z inżynierią powierzchni warstwę wierzchnią ukonstytuowaną w trakcie procesów obróbkowych określa się terminem *technologiczna warstwa wierzchnia*, dlatego też właściwe byłoby zastosowanie przez Doktoranta właśnie tego terminu;
- w pracy są stosowane zamiennie terminy *polaryzacja prosta/odwrotna* oraz *polaryzacja ujemna/dodatnia*, co może być mylące dla czytelnika;
- na rys. 6.5 (str. 124) porównane zostały zdjęcia mikroskopowe obrobionej powierzchni elektrodami AF-5 i S-180 wykonane przy różnych powiększeniach;
- przedstawiona na stronach 127 do 130 analiza morfologii pojedynczych kraterów erozyjnych dotyczy tylko elektrody AF-5.

Powyższe uwagi nie dotyczą jednak zasadniczych zagadnień metodycznych oraz merytorycznych i nie wpływają na moją ostateczną bardzo wysoką ocenę pracy.

## 4 Wniosek końcowy

Uwzględniając powyższe stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Rafała Nowickiego pt.: *Wpływ wielkości ziarna elektrod grafitowych na wskaźniki technologiczne i stan warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej* stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego. **Praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy, jej tematyka mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i może być dopuszczona do publicznej dyskusji przed Radą Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej.**

W mojej ocenie bardzo szeroki i dobrze zaplanowany zakres badań, całościowe podejście do wyjaśnienia sformułowanego problemu badawczego, biegłość i swoboda Doktoranta w opisie zjawisk fizycznych zachodzących podczas obróbki elektroerozyjnej oraz rzetelność i staranności w opracowaniu otrzymanych wyników są podstawą do wyróżnienia pracy.

