

dr hab. inż. Tomasz Paczkowski, prof. PBŚ  
Politechnika Bydgoska  
Wydział Inżynierii Mechanicznej  
Katedra Techniki Wytwarzania  
Al. Prof. S. Kaliskiego 7  
85-796 Bydgoszcz

Bydgoszcz, 31.05.2023 r.

## **RECENZJA**

rozprawy doktorskiej zatytułowanej:

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

Autor: **mgr inż. Rafał Nowicki**

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

Niniejsza recenzja opracowana została na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Warszawskiej, prof. dr hab. inż. Tomasza Chmielewskiego, pismem z dnia 19.04.2023 r.

#### **1. Charakterystyka pracy – ocena formalna**

Recenzowana praca zawiera 196 stron w tym 171 tekstu zasadniczego, obejmujące 10 rozdziałów, spis treści, wykaz symboli, akronimów i definicji oraz zestawienie bibliografii składającej się z 251 pozycji literaturowych, do których Autor odwołuje się w dysertacji. W pracy zamieszczono 141 rysunków, 27 tabel, 28 wzorów oraz 34 opracowanych przez Autora równań regresji umieszczonych w tabelach.

Problematyka rozprawy dotyczy zagadnień związanych z wpływem parametrów obróbki elektroerozyjnej (EDM) na stan warstwy wierzchniej stopu Hastelloy C22 z wykorzystaniem elektrod grafitowych o różnej wielkości ziarna. Technologia obróbki materiałów trudnoobrabialnych, jak C22, jest jedną z ważniejszych w przemyśle petrochemicznym i chemicznym do produkcji reaktorów chemicznych, wymienników ciepła, systemów odprowadzania spalin z utylizowanych odpadów, rur do transportu odpadów chemicznych itp. Pomimo licznych prac naukowych o charakterze teoretycznym

i doświadczalnym, poświęconych zagadnieniom obróbki EDM, mało jest prac dotyczących analizy wskaźników technologicznych i stanu warstwy wierzchniej obróbki stopu C22 w szczególności z zastosowaniem elektrod grafitowych.

Podjęcie się przez Autora przeprowadzenia wszechstronnych badań procesu drążenia metodą EDM trudnoobrabialnego stopu Hastelloy C22 i jego wpływu na stan warstwy wierzchniej oraz wskaźniki technologiczne jest w świetle dokonanych analiz i przytoczonych informacji w pełni uzasadnione. Należy podkreślić, że badanie procesów i operacji obróbkowych jest zawsze podstawowym czynnikiem rozwoju procesów wytwórczych, ich optymalizacji i doskonalenia jakości wyrobów.

Wybór tematu uważam również za właściwy, nie tylko z utylitarnego, ale przede wszystkim z poznawczego punktu widzenia. O aktualności wybranego tematu świadczy również cytowana przez Autora literatura, która to w większości pochodzi z ostatniego dziesięciolecia.

Rozprawa ma charakter doświadczalny, ponieważ główną jej wartością są wykonane badania dotyczące wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych, polaryzacji elektrod oraz parametrów EDM na stan warstwy wierzchniej i wskaźniki technologiczne procesu elektroerozji, co opisane zostało w rozdziałach 4 do 9. Rozdział 3, poprzedzający część badawczą pracy, zawiera cel i zakres pracy oraz w oparciu o zamieszczone w pracy pozycje literaturowe uzasadnienie podjęcia tematu. Zakres pracy Autor zawarł w dziewięciu punktach, z których zdaniem oceniającego najważniejsze dotyczą:

- badań doświadczalnych wpływu właściwości fizycznych oraz wielkości ziarna elektrod grafitowych, parametrów elektrycznych i polaryzacji elektrod na objętościową wydajność usuwanego materiału, względne zużycie elektrody roboczej, stan struktury geometrycznej powierzchni po obróbce, skład chemiczny powierzchni elektrod i próbki,
- wyznaczenie równań regresji opisujących wpływ wielkości ziarna elektrod grafitowych, charakteru impulsów elektrycznych i polaryzacji narzędzia na stan struktury geometrycznej i metalograficznej powierzchni, względne zużycie elektrody roboczej i wydajność procesu.

Wprowadzenie w temat oraz opis zagadnień dotyczących procesu obróbki elektroerozyjnej, metod drążenia elektroerozyjnego z wykorzystaniem elektrod z różnych materiałów zostały opisane odpowiednio w rozdziałach 1 i 2. We wprowadzeniu do rozprawy Doktorant w zwięzły sposób przedstawił problematykę poruszanego zagadnienia.

W rozdziale 2 Autor opisał stan zagadnienia obejmujący charakterystykę obróbki elektroerozyjnej. Szczegółowo opisuje zjawiska fizyczne determinujące proces usuwania materiału i ich wpływ na własności powstałej warstwy wierzchniej akcentując istotne dla jej rozwoju prowadzone badania. W kolejnych podrozdziałach opisał podstawy fizyczne tej obróbki, zaczynając od zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej, poprzez opis parametrów i ich wpływu na przyjęte w cytowanej literaturze wskaźniki technologiczne i użytkowe. W rozdziale tym opisał również funkcję dielektryka w odniesieniu do mechanizmu erozji. W dalszej części opisał zagadnienia związane z właściwościami

materiału elektrod i ich wpływem na proces EDM oraz z warstwą wierzchnią powierzchni po obróbce.

W rozdziałach tych tzn. 1 i 2, a szczególnie w rozdziale 2, Doktorant odnosi się do stanu wiedzy i techniki w obszarze podjętej tematyki pracy. Rozdziały 4 do 9 dotyczą wspomnianych wcześniej badań doświadczalnych. Są to najbardziej obszerne rozdziały pracy, w których opisano metodologię i badania doświadczalne wspomnianego wcześniej drążenia z wykorzystaniem elektrod grafitowych o różnej granulacji. Rozdział 4 zawiera szczegółowy opis stanowiska badawczego oraz aparatury pomiarowej. W kolejnej części tego rozdziału Autor pracy opisał zakres oraz warunki badań doświadczalnych, przeprowadził badania wstępne. W rozdziałach 5 do 9 Autor przedstawił wyniki badań w postaci licznych wykresów przestrzennych utworzonych na podstawie opracowanych równań regresji oraz współczynniki korelacji wielkości badanych do wielkości wejściowych. Każdą sekwencję badań doktorant kończy podsumowaniem. Posumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań zawarto w rozdziale 10 z podziałem na wnioski o charakterze użytkowym i poznawczym oraz do dalszych badań.

W podsumowaniu tej części opinii stwierdzam, że praca obejmuje zagadnienia technologiczne procesu drążenia trudnoobrabialnego materiału metodą EDM z wykorzystaniem elektrod grafitowych o różnej wielkości ziarna, analizę stanu struktury metalograficznej, metrologię powierzchni, planowania doświadczeń, użytkowania skomputeryzowanych systemów pomiarowych oraz akwizycję i statystyczną analizę wyników pomiarów.

Przyjęta przez doktoranta struktura pracy jest poprawna, zawiera bowiem składniki wymagane w rozprawie doktorskiej. Proporcje pomiędzy ilością informacji zawartych w części literaturowej i doświadczalnej zostały dobrane właściwie i są typowe dla prac o charakterze doświadczalnym.

## **2. Ocena merytoryczna pracy**

Praca doktorska mgr inż. Rafała Nowickiego poświęcona jest obróbce EDM materiału trudnoobrabialnego z wykorzystaniem elektrod grafitowych o różnej wielkości ziarna. Uważam, że temat pracy jest interesujący i aktualny. Opracowanie zawiera elementy nowości zarówno w sferze teoretycznej jak i użytkarnej. Autor sformułował ciekawy problem, który został następnie poddany analizie teoretycznej i badaniom eksperymentalnym. Cel pracy „wyznaczenie wpływu parametrów elektrycznych oraz wielkości ziarna elektrod grafitowych o wysokiej izotropowości (AF-5 i S-180) na wydajność objętościową drążenia elektroerozyjnego, względne zużycie elektrody roboczej i wynikowy stan warstwy wierzchniej oraz wyznaczenie statystycznych modeli matematycznych, umożliwiające dobór odpowiednich warunków obróbki w zależności od oczekiwanych wskaźników technologicznych procesu drążenia i jakości wykończenia powierzchni przedmiotu”, należy ocenić jako poprawnie sformułowany.

Obróbka elektroerozyjna jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych sposobów obróbki, spośród niekonwencjonalnych metod kształtowania przedmiotów i jednocześnie stanowi alternatywną metodę obróbki materiałów trudnoobrabialnych tradycyjnymi metodami skrawania. Stosowana jest do wytwarzania otworów i powierzchni o złożonych kształtach, w tym szczególnie do produkcji form i matryc w przetwórstwie tworzyw sztucznych a także obróbce plastycznej, w przemyśle lotniczym, nuklearnym, chemicznym i petrochemicznym. EDM jako podstawowa technologia ma prawie 80 lat, ale mimo to nadal posiada ogromny potencjał odkryć i innowacji. Przyczyną takiej sytuacji są przede wszystkim czynniki technologiczne, takie jak: miniaturyzacja, nowe materiały w tym na elektrody robocze, czy technologie wymagające jeszcze lepszej precyzji wykonania narzędzi i maszyn.

Z powyższymi problemami wiąże się bezpośrednio opiniowana rozprawa.

**Z uwagi na powyższe uważam, że jest w pełni uzasadniony wybór tematyki opiniowanej rozprawy nt. "Wpływ wielkości ziarna elektrod grafitowych na wskaźniki technologiczne i stan warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej".**

Przystępując do eksperymentu, trzeba mieć wiedzę zarówno teoretyczną jak i z zakresu technik i metod badawczych. Autor pracy dokonał bardzo obszernego przeglądu literatury. Ilość przeanalizowanych pozycji jest charakterystyczna dla dysertacji habilitacyjnych. Studium literaturowe zawarto w rozdziale drugim „Stan zagadnienia z zakresu obróbki elektroerozyjnej”. W tym bardzo obszernym studium literaturowym analiza stanu wiedzy odnośnie zagadnień związanych z tematyką pracy, w pewnej jego części, ograniczała się do prezentacji zawartych tam informacji. W niewielkim stopniu Doktorant zajął stanowisko odnośnie podawanych informacji lub podjął się ich krytycznej oceny, chociażby w kontekście podjętego tematu pracy. Dokonany krytycyzm przeglądu literatury pozwoliłby należycie oświetlić temat pracy i postawić w stosunku do niego pytania szczegółowe: co robić?, jak robić?, co pominąć?, co jeszcze wprowadzić?

W największym stopniu uwaga ta dotyczy opisanych badań dotyczących wskaźników technologicznych i stanu warstwy wierzchniej po obróbce elektroerozyjnej, a także wpływu parametrów tej obróbki na zużycie elektrody roboczej. Problematyka ta wiąże się bezpośrednio z tematyką pracy. Należy jednak podkreślić, że Autor wnikliwie opracował tą część rozprawy. Faktycznie opisał wszystkie aspekty i kierunki badań obróbki EDM uwzględniając rolę dielektryka i materiałów, z których wykonane są elektrody (anoda i katoda). Należy także dodać, że dobór źródeł jest poprawny. Zawiera on 251 pozycji z czego, co należy podkreślić, większość publikacji jest z ostatniego dziesięciolecia w tym 9 publikacji jest współautorskich związanych z tematyką rozprawy.

Podsumowanie przeglądu literatury zawarte jest w pkt. 3.1 „Uzasadnienie podjęcia pracy”. Autor wskazuje w nim czynniki mające wpływ na efekty obróbki elektroerozyjnej oraz stwierdza, że „w dostępnych publikacjach naukowych nie analizuje się kompleksowego wpływu właściwości fizycznych i wielkości ziarna elektrod grafitowych o wysokiej izotropowości, a także parametrów elektrycznych na wskaźniki technologiczne i stan warstwy wierzchniej” i dalej, że brak jest tego typu badań dla „stopu Hastelloy C-22

z wykorzystaniem elektrod grafitowych S-180 i AF-5 firmy POCO". Zdaniem oceniającego wnioski te są najważniejsze z punktu widzenia podjęcia tematu pracy.

Sformułowane w rozdziale 3 cel i zakres pracy zrealizowano na drodze badań eksperymentalnych. Doktorant zastosował poprawny układ prowadzenia badań naukowych, polegający na analizie teoretycznej zagadnienia, opisie zjawisk obróbkowych, by na zakończenie zweryfikować je doświadczalnie. Eksperymenty technologiczne były przeprowadzone etapami. Najpierw wykonano badania wstępne – rozpoznawcze. Miały one na celu znalezienie zakresu stabilnych parametrów obróbki półwykończeniowej i wykończeniowej EDM. Na podstawie wyników tych badań określono przedziały zmienności nastaw obrabiarki, co pozwoliło przeprowadzić badania zasadnicze. Opis wykorzystanej aparatury badawczej oraz stanowiska badawczego zamieszczono w rozdziale 4. Do badań użyto próbki w postaci walców z materiału trudnoobrabialnego Hastelloy C-22. Użyty w eksperymencie materiał na elektrody (elektrodę roboczą i próbkę) został przez Autora pracy uzasadniony. Wyniki badań zaprezentowano w rozdziałach 5 do 9.

W wyniku badań otrzymano wpływ wielkości ziarna elektrod grafitowych na: wskaźniki technologiczne, chropowatość powierzchni, strukturę metalograficzną powierzchni po obróbce EDM. Kolejne badania dotyczyły składu chemicznego powierzchni próbek oraz udziału nośnego po obróbce EDM. Poszczególne sekwencje badań Autor podsumowuje w postaci komentarzy wyjaśniających uzyskane wyniki oraz prezentuje na licznych wykresach.

Zrealizowane poprawnie liczne testy, ich opracowanie, wykazały bardzo dobrą znajomość metod badawczych oraz umiejętność prowadzenia prac doświadczalnych.

Uważam, że rozdziały 5, 6 i 9 stanowią najważniejszą część pracy i z nimi wiąże się znaczący i oryginalny wkład mgr inż. Rafała Nowickiego w rozwój technologii obróbki materiałów trudnoobrabialnych elektrodami grafitowymi. Podsumowując do elementów nowości naukowej stanowiących oryginalny dorobek Doktoranta zaliczam:

- Opracowanie równań regresji i analiza uzyskanych wyników badań wpływu wielkości ziarna elektrod grafitowych na wydajność objętościową drążenia, względne zużycie elektrody roboczej.
- Opracowanie równań regresji opisujących kształtowanie SGP oraz strukturę metalograficzną powierzchni w funkcji wielkości ziarna elektrod grafitowych i parametrów obróbki EDM.

Ważniejsze uwagi krytyczne, oraz pod dyskusję, w odniesieniu do badań dotyczą w szczególności zagadnień wymienionych poniżej:

- Wybór materiału do badań w postaci stopu Hastelloy C22 Doktorant uzasadnia brakiem szczegółowych badań opisanych w literaturze z wykorzystaniem elektrod grafitowych oraz potrzebą poznania mechanizmów konstytuowania się warstwy wierzchniej w celu uzyskania wysokiej jakości powierzchni po EDM (73<sup>8</sup>). Dla wzmocnienia przekazu dobrze by było podać przykłady takich detali. Badany materiał wykorzystywany jest głównie w przemyśle petrochemicznym

a nie narzędziowym, gdzie faktycznie wymagania dokładnościowe stawiane są na najwyższym poziomie.

- Zbyt skromnie opisane i niezilustrowane w postaci wykresów, morfologii powierzchni czy tabel badania wstępne. Doktorant przytoczył jedynie stabilne i niestabilne przebiegi napięciowo-prądowe w funkcji czasu. Przyjęty zakres zmienności wejściowych parametrów elektrycznych jest bardzo szeroki (93<sup>2</sup>). Dodatkowo brak informacji dotyczącej procedury dochodzenia do parametrów stabilnych. Należy dodać, że ostatecznie w badaniach zasadniczych zakres zmienności większości parametrów zawężono do wartości około 0,1 zakresu z badań wstępnych.
- W opinii oceniającego nieuprawnione jest stwierdzenie, że „statystyczne modele matematyczne, oparte na danych empirycznych przedstawiają model rzeczywisty ...” (97<sup>3</sup>) Powinno się mówić o obiekcie rzeczywistym. Z pojęciem modelu niezależnie od jego rodzaju wiążą się uproszczenia i trudno tu używać pojęcia rzeczywisty.
- Doktorant na podstawie obserwacji makroskopowych stwierdza, „że powierzchnie uzyskane w trakcie drążenia charakteryzują się wysoką izotropowością ...” (148<sup>1</sup>). Obserwacja jest procesem bardzo subiektywnym, często zależy od szczegółowości obrazu. Nasuwa się pytanie czy zastosowano do oceny izotropowości jakieś kryteria?
- W badaniach do oceny np. grubości warstwy przetopionej Doktorant używał mikroskopu optycznego Olympus BX51M (157<sup>6</sup>) sprzężonego z kamerą cyfrową rejestrującą 5 mlnpix (86<sup>11</sup>). Uzyskane wyniki pomiaru podawane są w  $\mu\text{m}$ . Dodatkowych wyjaśnień wymaga rozdzielczość i dokładność takiego pomiaru. Ilość pikseli umieszczonych na sensorze kamery jest informacją niewystarczającą do takiej oceny.

W podsumowaniu pracy (rozdział 10) Doktorant zaprezentował najważniejsze osiągnięcia o charakterze użytkowym i poznawczym oraz ze wskazaniem do dalszych badań. W tym miejscu należy stwierdzić, że Doktorant zrealizował założone badania, osiągając planowane cele naukowe, a zawartość pracy ściśle odpowiada jej tematowi. Zdaniem oceniającego we wnioskach dotyczących dalszych badań zabrakło problemów związanych z dokładnością obróbki, inaczej mówiąc z oceną makrogeometrii obrabianych powierzchni. W przeprowadzonych badaniach i we wcześniejszych wnioskach Autor pisze o nierównomierności zanieczyszczenia szczeliny międzyelektrodowej i w konsekwencji konieczności wymuszonego jej przepłukiwania. Te zjawiska między wpływają innymi na dokładność makrogeometrii obrabianych powierzchni.

Autor pracy nie ustrzegł się błędów językowych, stylistycznych i edytorskich, które nie umniejszają w znaczący sposób dokonań doktoranta np.:

- (47<sup>17</sup>) „Elektroda wolframowa charakteryzuje się ... . Z drugiej strony posiada ... Jest również trudny w obróbce mechanicznej ...”
- (91<sup>15</sup>) „Pomiar natężenia prądu realizowano metoda pośrednią ...”
- (116<sup>11</sup>) „Jest to spowodowane bezpośrednio z intensywnym użyciem ...”

Pomimo tych błędów należy podkreślić bardzo dużą staranność wykonania pracy.

## **Wniosek końcowy**

W podsumowaniu niniejszej recenzji należy stwierdzić, że pomimo wykazanych uchybień rozprawa doktorska zawiera elementy wartościowe pod względem poznawczym i utylitarnym. Tematyka rozprawy doktorskiej jest aktualna i została dobrana trafnie i zasadnie pod względem merytorycznym. Doktorant wykazał się znaczną wiedzą w zakresie zagadnień prezentowanych w pracy. W związku z powyższym, oceniam pracę doktorską mgr inż. Rafała Nowickiego, jako spełniającą wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z obowiązującą Ustawą o stopniach i tytułach naukowych i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Chciałbym jednocześnie zaznaczyć, że złożoność rozwiązanego problemu naukowego, szeroki, dobrze zaplanowany zakres badań oraz przejrzystość w jego realizacji są podstawą do wyróżnienia tej pracy.

*Tomasz Paczkowski*