

dr hab. inż. Tomasz Paczkowski prof. nadzw. UTP
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Instytut Technik Wytwarzania
Al. Prof. S. Kaliskiego 7
85-789 Bydgoszcz

Bydgoszcz, 07.06.2018 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr inż. Magdaleny Machno**

zatytułowanej:

Obróbka elektrochemiczno-elektroerozyjna głębokich otworów w materiałach trudnoobrabialnych

Niniejsza recenzja opracowana została na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej, prof. dr hab. inż. Jerzego A. Śładka, pismem z dnia 25.04.2018 r.

1. Charakterystyka pracy – ocena formalna

Recenzowana praca zawiera 164 strony, w tym 152 tekstu zasadniczego, obejmujące 10 rozdziałów, spis treści, wykaz symboli, akronimów i definicji oraz zestawienie bibliografii składającej się z 135 pozycji literaturowych, do których Doktorantka odwołuje się w dysertacji. W pracy zamieszczono 145 rysunków, 16 tabel oraz 36 wzorów, w tym opracowane przez Doktorantkę równania regresji.

Problematyka rozprawy dotyczy zagadnień związanych z obróbką głębokich otworów o zarysie kołowym w materiałach trudnoobrabialnych metodą elektrochemiczno-elektroerozyjną. Technologia takich otworów dotyczy wielu gałęzi przemysłu, takich jak lotniczy czy motoryzacyjny, jest jedną z ważniejszych w produkcji elementów turbodrzutowych silników lotniczych oraz dysz wtryskowych w silnikach spalinowych. Pomimo licznych prac naukowych o charakterze teoretycznym i doświadczalnym, poświęconych zagadnieniom obróbki głębokich otworów, mało jest prac dotyczących metod hybrydowych technologii otworów o średnicy poniżej 1 mm i smukłości 20:1. Podjęcie się przez Doktorantkę przeprowadzenia wszechstronnych badań technologii tego typu otworów i jej wpływu na dokładność wymiarowo-kształtową oraz chropowatość, 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 poznawczego, ale przede wszystkim z utylitarnego punktu widzenia. Jego realizacja wymagała stosowania nowoczesnych metod badań, zarówno teoretycznych jak i doświadczalnych, a także analizy i wnioskowania. Można więc na tej podstawie ocenić umiejętność samodzielnego prowadzenia badań (zgodnie z wymogami ustawy o stopniach i tytułach). O aktualności wybranego tematu świadczy również cytowana przez Doktorantkę literatura, która w większości pochodzi z ostatniego dziesięciolecia.

Rozprawa ma charakter teoretyczno-doświadczalny, jednak główną jej wartością są wykonane badania dotyczące wpływu podstawowych parametrów procesu, takich jak napięcie robocze, czas impulsu, amplituda natężenia prądu, ciśnienie dostarczania cieczy roboczej do obszaru obróbki, obroty elektrody roboczej na dokładność wymiarowo-kształtową otworów, ich smukłość, liniowe zużycie elektrody roboczej oraz wydajność obróbki. Zasadnicze badania i ich wyniki wraz z komentarzem i analizą opisane zostały w rozdziałach 8 i 9. Odpowiednio w rozdziałach 2 i 3 Doktorantka dokonała wprowadzenia do tematu pracy oraz zawarła tezę, cel i jej zakres, natomiast w rozdziale 4, w oparciu o zamieszczone w pracy pozycje literaturowe, uzasadniła podjęcie tematu. Zostały tutaj scharakteryzowane trzy procesy: wiercenia skrawaniem, elektroerozyjnego drążenia obrotowego oraz drążenia elektrochemicznego. W podrozdziałach tych zostały opisane podstawy fizyczne tych obróbek, zaczynając od zjawisk zachodzących w strefie obróbki, poprzez opis parametrów i ich wpływu na przyjęte w cytowanej literaturze wskaźniki użytkowe. Rozdział ten kończą rozważania dotyczące integracji obróbki elektrochemicznej i elektroerozyjnej w procesach obróbki hybrydowej i łączonej. Na podstawie literatury zostały szczegółowo wyjaśnione modele zjawisk zachodzące podczas integracji tych obróbek według różnych autorów oraz wskazano na rozbieżności w opisie poszczególnych modeli. Rozdział ten kończą wnikliwie wnioski z analizy literatury. Doktorantka w dwudziestu punktach wskazała na najistotniejsze elementy dotyczące tematu pracy. Należy podkreślić szeroką i szczegółową analizę stanu wiedzy i techniki w obszarze podjętej tematyki pracy.

Zakres pracy Doktorantka zawarła w pięciu punktach, z których zdaniem oceniającego najważniejsze dotyczą opracowania cieplnego modelu matematycznego, obejmującego nagrzewanie się cieczy roboczej oraz wykonanie na jego podstawie symulacji komputerowej, co zostało opisane w rozdziale 7, a także wyznaczenie funkcji obiektu badań $f(U, t_i, I)$ czyli wpływu średniego napięcia roboczego, czasu impulsu i amplitudy natężenia prądu na parametry makro i mikro geometrii wydrążonych otworów w stopach: niklowo-chromowym INCONEL 718 oraz tytanu Ti-6Al-4V. Określono także zależności liniowego zużycia elektrody roboczej i prędkości drążenia od parametrów procesu. Badania przeprowadzono w dwóch wariantach: z i bez wywoływania obrotów elektrody roboczej. Każdą sekwencję badań Doktorantka kończy podsumowaniem. Należy dodać, że w rozdziale 5 zostało szczegółowo opisane stanowisko badawcze, w opracowaniu którego brała udział Doktorantka oraz opisane badania wstępne procesu hybrydowego drążenia otworów o zarysie kołowym.

Posumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań zawarto w rozdziale 10 z podziałem na wnioski o charakterze poznawczym, utylitarnym i rozwojowym.

W podsumowaniu tej części opinii stwierdzam, że praca obejmuje zagadnienia technologiczne procesu hybrydowego drążenia głębokich otworów o zarysie kołowym metodą elektrochemiczno-elektroerozyjną, pomiary dokładności wymiarowo kształtowej, metrologię powierzchni, planowania doświadczeń, użytkowania skomputeryzowanych systemów pomiarowych oraz akwizycję i statystyczną analizę wyników pomiarów.

Przyjęta przez Doktorantkę 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. Magdaleny Machno poświęcona jest obróbce głębokich otworów o zarysie kołowym w materiałach trudnoobrabialnych metodą elektrochemiczno-elektroerozyjną. Uważam, że temat pracy jest interesujący i aktualny. Opracowanie zawiera elementy nowości, przede wszystkim w sferze utylitarnej. Doktorantka sformułowała ciekawy problem, który został następnie poddany analizie teoretycznej i badaniom eksperymentalnym. Cele pracy dotyczące poszerzenia wiedzy na temat hybrydowego drążenia głębokich otworów, opracowanie modelu matematycznego i numerycznego procesu nagrzewania się cieczy roboczej podczas pojedynczego impulsu oraz przeprowadzenie badań doświadczalnych drążenia tego typu otworów metodą hybrydową elektrochemiczno-elektroerozyjną, należy ocenić jako poprawnie sformułowane.

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. EDM jako podstawowa technologia ma prawie 70 lat, ale mimo to nadal posiada ogromny potencjał odkryć i innowacji. Połączenie tej obróbki z elektrochemiczną potęguje ten potencjał. Przyczyną takiej sytuacji są przede wszystkim czynniki technologiczne, takie jak: miniaturyzacja, nowe materiały, czy technologie wymagające jeszcze lepszej precyzji wykonania chociażby smukłych otworów o średnicach poniżej 1 mm, dla których trudności technologiczne rosną wraz z ich głębokością.

Z powyższymi problemami wiąże się bezpośrednio opiniowana rozprawa.

Z uwagi na powyższe uważam, że jest w pełni uzasadniony wybór tematyki opiniowanej rozprawy nt. "Obróbka elektrochemiczno-elektroerozyjna głębokich otworów w materiałach trudnoobrabialnych".

W obszernym studium literaturowym zawartym w pracy, analiza stanu wiedzy odnośnie zagadnień związanych z tematyką pracy, w pewnej jego części, ograniczała się do prezentacji zawartych tam informacji. W niewielkim stopniu Doktorantka zajęła stanowisko odnośnie podawanych informacji lub podjęła się ich krytycznej oceny. W największym stopniu

uwaga ta dotyczy opisanego modelu matematycznego, nagrzewania się cieczy roboczej podczas pojedynczego impulsu. Problematyka ta jest jednym z założonych celów pracy. Należy jednak podkreślić, że Doktorantka wnikliwie opracowała tę część rozprawy. Faktycznie opisała wszystkie aspekty i kierunki badań obróbki EDM i ECM. Pewne wątpliwości oceniającego budzi zasadność podrozdziału 4.1, w którym Doktorantka scharakteryzowała proces wiercenia skrawaniem, natomiast pominęła wymienione i porównane w tabeli 1 z obróbkami EDM i ECM, obróbki wiązką elektronową oraz laserową.

Należy jednak stwierdzić, że dobór źródeł jest poprawny. Zawiera on 135 pozycji w tym 2 publikacje współautorskie Doktorantki.

Podsumowanie przeglądu literatury zawarte jest w podrozdziale 4.5. W licznych punktach Doktorantka wskazuje w nim czynniki wejściowe i wynikowe, mające wpływ na efekty obróbki elektroerozyjnej a także hybrydowej elektrochemiczno-elektroerozyjnej, oraz stwierdza, że *„zastosowanie procesu ECDM do wykonania otworów pozwala zwiększyć wydajność procesu w porównaniu do procesów EDM i ECM. Uzyskane otwory cechują się lepszą dokładnością odwzorowania. Nie da końca wyjśniony przebieg procesu stanowi utrudnienie przy daborze odpowiednich parametrów procesu”*. Moim zdaniem wnioski te są najważniejsze z punktu widzenia podjęcia tematu pracy.

Sformułowane w rozdziale 3 cele i zakres pracy zrealizowano na drodze badań teoretycznych i eksperymentalnych.

Zakres badań teoretycznych obejmował modelowanie matematyczne nagrzewania cieczy roboczej w szczeliny międzyelektrodowej podczas trwania pojedynczego impulsu, oraz przeprowadzenie symulacji komputerowej w celu wyznaczenia krytycznego czasu impulsu. Zdaniem oceniającego metodyka wyznaczenia przyrostu temperatury cieczy w szczeliny międzyelektrodowej w czasie impulsu napięciowego jest identyczna jak w pracach prof. J. Kozaka. Oszacowanie jednego z członów równania (17) 61₄ zacytowano na podstawie pozycji literaturowej [116], a można tu było zacytować rzeczywiste warunki przyjęte w badaniach. Końcowa zależność opisująca przyrost temperatury jest również zacytowana z pozycji [5] spisu literatury. Trudno więc uznać, że przedstawiony model matematyczny jest modelem autorskim Doktorantki. Niewątpliwie Doktorantka opracowała odpowiednie procedury umożliwiające symulację komputerową wyznaczenia, bardzo istotnego dla poprawnego prowadzenia procesu hybrydowego ECDM, krytycznego czasu impulsu.

Badania eksperymentalne były przeprowadzone etapami. Najpierw wykonano badania wstępne oraz rozpoznawcze. Miały one na celu sprawdzenie możliwości wykonania głębokich otworów o przekroju kołowym metodą hybrydową ECDM, oraz przetestowanie zaprojektowanego stanowiska badawczego. Na podstawie wyników badań rozpoznawczych określono przedziały zmienności czynników wejściowych, co pozwoliło przeprowadzić badania zasadnicze. Opis wykorzystanej aparatury badawczej oraz stanowiska badawczego zamieszczono w rozdziale 5. Badania zasadnicze opisano w rozdziale 8. We wstępie do rozdziału określono trzy cele badań, z których zdaniem oceniającego drugi i trzeci zostały w pełni zrealizowane. Do badań zasadniczych użyto próbki dzielonej zgodnie z projektem Doktorantki. Koncepcję próbki dzielonej oceniam pozytywnie. Brakuje jednak tutaj analizy związanej

z dokładnością wykonania powierzchni bazowych elementów próbki dzielonej, oraz dodatkowego oprzyrządowania w kontekście położenia osi otworów ceramicznego przewodnika. Dodatkowych wyjaśnień wymaga również kwestia szczelności powierzchni próbki dzielonej.

Użyty w eksperymencie zasadniczym materiał na elektrody (elektrodę roboczą i próbkę) został przez Doktorantkę pracy uzasadniony. Wyniki badań zaprezentowano w rozdziałach 8 i 9. W wyniku badań otrzymano wpływ: średniego napięcia roboczego, czasu impulsu oraz amplitudy natężenia prądu na liniowe zużycie elektrody roboczej, średnią szczelinę boczną, stożkowatość otworu, średnią prędkość drążenia, smukłość otworu oraz chropowatość powierzchni otworu. Poszczególne sekwencje badań Doktorantka podsumowuje w postaci komentarzy wyjaśniających uzyskane wyniki.

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej i procedury rozwiązywania postawionych zadań badawczych, metodologiczną i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam pozytywnie. Zawiera ona analizę złożonego problemu, jakim jest proces hybrydowego drążenia głębokich otworów. Rozwiązanie założonych celów pracy było możliwe dzięki dużej wnikliwości poznawczej i badawczej Doktorantki.

O właściwym przygotowaniu Doktorantki do prowadzenia prac badawczych świadczą: rzeczowa i merytoryczna analiza, synteza literatury, zastosowanie wiedzy logiczno-matematycznej z zakresu badanych procesów oraz planowania i opracowania wyników pomiarów, umiejętność korzystania z odpowiednich programów komputerowych do analizy i weryfikacji wyników.

Za oryginalny i ważny pod względem naukowym oraz użytecznym wkład Doktorantki w rozwiązanie postawionego problemu badawczego uznaję:

- usystematyzowanie wiedzy nt. hybrydowego procesu elektrochemiczno-elektroerozyjnego drążenia głębokich otworów o zarysie kołowym.
- opracowanie programu badań doświadczalnych z wykorzystaniem komputerowych metod obliczeniowych oraz bardzo obszerne i starannie przeprowadzone badania.

Ważniejsze uwagi krytyczne, oraz pod dyskusję, które być może, pomogą Doktorantce ukierunkować dalsze badania własne, dotyczą zagadnień wymienionych poniżej:

- Brak uzasadnienia wyboru stali nierdzewnej 0H18N9 w badaniach wstępnych. Należy dodać, że cytowane oznaczenie stali nierdzewnej nie jest zgodne z normą, natomiast w głównych celach pracy, w jednym z podpunktów (11¹⁶) Doktorantka deklaruje do badań stopy: niklowo-chromowy INCONEL 718 oraz tytanu Ti-6Al-4V.
- Dodatkowych wyjaśnień wymaga stwierdzenie „Analizie poddawany był tzw. jednostkowy punkt przekroju - S_{ti} w szczelinie międzyelektrodowej w czasie t_i . Dlatego też wymiana ciepła w tym przypadku nie może być rozpatrywana w oparciu o konwekcję”. Zdaniem oceniającego pomijanie lub wyzerowanie członów równania powinno odbywać się na podstawie przeprowadzonych oszacowań.
- W założeniach do modelu matematycznego w punkcie 12 (60₁₈) Doktorantka przyjęła, że prędkość przepływu cieczy w czasie trwania impulsu jest stała. Zdaniem

oceniającego podobnie jak we wcześniejszej uwadze przyjęcie takiego założenia wymaga uzasadnienia. W rozpatrywanym przypadku sposób zasilania szczeliny międzyelektrodowej elektrolitem oraz kształt elektrody roboczej wskazuje, że mamy do czynienia z przepływem osiowo-symetrycznym. W tym przypadku dla każdego znanego modelu przepływu cieczy, przy zasilaniu stałą różnicą ciśnień lub stałym objętościowym strumieniem, prędkość cieczy zmienia się wraz ze zmianą promienia. Obraz zmiennych wektorów prędkości w szczelinie międzyelektrodowej został przedstawiony w pracy na rysunku 105.

- Rysunek 32 nie przedstawia schematu układu współrzędnych. Zdaniem oceniającego brakuje rysunku przedstawiającego obszar przepływu elektrolitu, dla rozpatrywanego przypadku wraz z zaznaczonymi układami współrzędnych np. globalnym Z,R (typowy dla przepływów osiowosymetrycznych) i lokalny np. x,y . Taki rysunek być może zmusiłby Doktorantkę do refleksji czy lokalny układ współrzędnych dla rozpatrywanych przypadków elektrod jest potrzebny. Brak tych uściśleń może wywołać pytanie jakiego modelu (płaskiego czy osiowo-symetrycznego) przepływu dotyczy równanie energii (13).
- Dodatkowych wyjaśnień wymaga oznaczenie L na rysunkach 32 i 40. W pierwszym przypadku Doktorantka poprzez L oznaczyła długość fragmentu szczeliny międzyelektrodowej, w drugim zaś średnicę wydrążonego otworu, co w podpisie pod rysunkiem nazwała: *charakterystyczna długość szczeliny roboczej*. Jeżeli chodzi o charakterystyczną długość szczeliny roboczej dla elektrod osiowo-symetrycznych, gdzie występuje przepływ osiowo-symetryczny, rozumie się różnicę między promieniem zewnętrznym i wewnętrznym elektrody roboczej.
- Jednym z celów badań zasadniczych było poznanie w lepszym stopniu zjawisk występujących w szczelinie międzyelektrodowej. Poprzez poznanie zjawisk rozumiem dociekanie przyczyn ich występowania i poznanie mechanizmów ich przebiegu. Proces ten powinien doprowadzić do twierdzeń hipotez lub teorii. We wnioskach do badań nie znajdują tych elementów. Za próbę podjętą w pracy przez Doktorantkę poznania zjawisk zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej można uznać przeprowadzenie symulacji przyrostu temperatury w czasie trwania impulsu napięciowego, oraz analizę przeprowadzoną w programie AnsysFluent przepływu cieczy roboczej przez szczelinę międzyelektrodową. Analizy takie nie są jednak elementem prezentowanych badań doświadczalnych.
- Na rysunkach 73 i 74 przedstawiających projekt dzielonych próbek oraz projekt oprzyrządowania do zamocowania ceramicznych przewodników brakuje, dla wybranych wymiarów, zawężonej tolerancji wykonania, znaków chropowatości oraz odchyłek kształtu np. płaskości czy prostopadłości odniesionych do odpowiednich baz konstrukcyjnych i technologicznych. Zdaniem oceniającego zapewnienie położenia osi elektrody roboczej w płaszczyźnie dzielonych próbek jest jednym z podstawowych warunków poprawnego przeprowadzenia eksperymentu.

- Brak analizy położenia (np. względem bazy konstrukcyjnej jaką stanowi górna powierzchnia próbek dzielonych) oraz kształtu osi wydrążonych otworów w próbkach dzielonych. Zdaniem oceniającego analiza taka uwiarygodniłaby profile kształtu na wykresach 84, 85, 87, 88, 89, 90, 93, 94 oraz wzmocniłaby aplikacyjność tej technologii.
- W przeprowadzonej symulacji przepływu dielektryka w programie AnsysFluent Doktorantka przyjęła konkretne materiały (miedź, INCONEL 718) dla elektrod. Zdaniem oceniającego w przypadku analizy tylko przepływu cieczy, bez analizy innych procesów zachodzących w szczelinie międzyelektrodowej, przyjęcie konkretnych materiałów dla elektrod nie ma znaczenia. Istotne byłoby podanie warunków brzegowych dotyczących prędkości oraz parametrów fizycznych cieczy takich jak gęstość, lepkość.

W podsumowaniu pracy (rozdział 10) Doktorantka zaprezentowała najważniejsze osiągnięcia o charakterze poznawczym, utylitarnym oraz rozwojowym. W ramach wniosków o charakterze utylitarnym Doktorantka stwierdza cyt.: *„w celu zmniejszenia stożkowatości oraz ujednoczenia właściwości warstwy wierzchniej otworu ciśnienie dostarczanie cieczy roboczej powinno być funkcją głębokości drążenia”*. Stwierdzenie to wymaga dodatkowych wyjaśnień w kontekście wniosku z badań, że ciśnienie dostarczania cieczy roboczej do obszaru obróbki ma nieznaczny wpływ na przebieg procesu.

Należy jednak stwierdzić, że Doktorantka zrealizowała na dobrym poziomie założone badania oraz cele naukowe, a zawartość pracy ściśle odpowiada jej tematowi.

Stosowane przez Doktorantkę definicje, nazwy i określenia są generalnie poprawne. Zdarzają się jednak potknięcia językowe i stylistyczne. Np. zamiast określenia „opracowanie modelu obejmującego proces” (11¹³), powinno być określenie „opracowanie modelu matematycznego obejmującego proces”.

Doktorantka nie ustrzegła się błędów stylistycznych, interpunkcyjnych i edytorskich, które nie umniejszają w znaczący sposób Jej dokonań np.: na str. 15⁸, 34⁸, 53², 74¹⁵, 82¹¹, 82⁷, 119²⁶, 151¹⁵.

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. Doktorantka wykazała się znaczną wiedzą w zakresie zagadnień prezentowanych w pracy. W związku z powyższym oceniam pracę doktorską mgr inż. Magdaleny Machno, jako spełniającą wymagania określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z2005 r. Nr 164 poz. 1365) i wnoszę o dopuszczenie Jej do publicznej obrony przed Radą Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej.

Tomasz Parzbał