

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, 17.03.2016 r.

## **RECENZJA**

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Dominika Dudka**

zatytułowanej:

### **Badania wpływu warunków drażenia elektroerozyjnego trepanacyjnego na efekty obróbki**

Niniejsza recenzja opracowana została na zlecenie Dziekana Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej, prof. dr hab. inż. Zbigniewa Koruby, pismem z dnia 23.02.2016 r.

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

Recenzowana praca zawiera 164 strony w tym 145 tekstu zasadniczego, obejmujące 6 rozdziałów, spis treści, wykaz symboli, akronimów i definicji oraz zestawienie bibliografii składającej się z 107 pozycji literaturowych, do których autor odwołuje się w dysertacji. W pracy zamieszczono 115 rysunków, 34 tabel oraz 61 wzorów z czego 55 to opracowane przez Autora pracy równania regresji.

Problematyka rozprawy dotyczy zagadnień związanych z obróbką otworów o zarysie obrotowym metodą EDM z zastosowaniem elektrody rurkowej tzw. drażenia trepanacyjnego. Technologia takich otworów jest jedną z ważniejszych w produkcji matryc na rzecz różnego rodzaju przemysłów a także narzędzi np. do przetwórstwa tworzyw polimerowych. Pomimo licznych prac naukowych o charakterze teoretycznym i doświadczalnym, poświęconych zagadnieniom obróbki EDM mało jest prac dotyczących uzyskiwanych w wyniku tej obróbki dokładności, a w szczególności dotyczy to badań dokładności otworów osiowosymetrycznych.

Podjęcie się przez Autora przeprowadzenia wszechstronnych badań procesu drażenia trepanacyjnego i jego wpływu na dokładność wymiarowo-kształtową i chropowatość wykonywanych otworów 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 użytkowego 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 nastaw obrabiarki elektroerozyjnej, takich jak czas impulsu, czas przerwy, wartość natężenia prądu wyładowania oraz sposobu przepłukiwania szczeliny międzyelektrodowej na jakość technologiczną obróbki, co opisane zostało w rozdziałach 4 i 5. 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 siedmiu punktach, z których zdaniem oceniającego najważniejsze dotyczą wyznaczenia równań regresji oraz określenie korelacji funkcji przyjętych parametrów wejściowych na parametry makro i mikro geometrii wydrążonych otworów oraz na wydajnościowe wskaźniki użytkowe obróbki elektroerozyjnej. Opis zagadnień dotyczących procesu obróbki elektroerozyjnej oraz metod drażenia elektroerozyjnego otworów osiowosymetrycznych zostały opisane odpowiednio w rozdziałach 1 i 2. W rozdziale 1 Autor opisał rozwój obróbki elektroerozyjnej, zaczynając od jej początków, 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 użytkowe. W rozdziale tym wykazał również, że zagadnienia dokładności obróbki, dotyczące falistości i błędów kształtu dotyczą głównie efektów obróbki WEDM. W dalszej części opisał sposoby przepłukiwania szczeliny międzyelektrodowej, uzasadniając jednocześnie podjęcie tej problematyki w swoich badaniach. 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. Rozdział 2 bowiem dotyczy charakterystyki metod drażenia elektroerozyjnego otworów o zarysach obrotowych. Rozdziały 4 i 5 dotyczą wspomnianych wcześniej badań doświadczalnych. Są to najbardziej obszernie rozdziały pracy, w których opisano metodykę i badania doświadczalne wspomnianego wcześniej drażenia trepanacyjnego otworów osiowosymetrycznych. Rozdział 4 zawiera szczegółowy opis stanowiska badawczego oraz aparatury pomiarowej. W kolejnej części tego rozdziału Autor pracy opisał zakres oraz warunki badań doświadczalnych. W rozdziale 5 przedstawiono 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 6 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 drażenia otworów metodą EDM, pomiary dokładności wymiarowo kształtowej, 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. Dominika Dudka poświęcona jest obróbce EDM otworów osiowosymetrycznych metodą trepanacyjną. Uważam, że temat pracy jest interesujący i aktualny. Opracowanie zawiera elementy nowości zarówno w sferze teoretycznej jak i użytkowej. Autor sformułował ciekawy problem, który został następnie poddany analizie teoretycznej i badaniom eksperymentalnym. Cel pracy „określenie wpływu nastaw obrabiarki tj. czasu impulsu, czasu przerwy, wartości natężenia prądu wyładowania oraz sposobu przepłukiwania szczeliny międzyelektrodowej na jakość technologiczną obróbki, określoną poprzez parametry SGP, wydajność oraz dokładność obróbki”, 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 i narzędzi chirurgicznych. EDM jako podstawowa technologia ma prawie 70 lat, ale mimo to nadal posiada ogromny potencjał odkryć i innowacji. Przyczyną takiej sytuacji są przede wszystkim czynniki technologiczne, takie jak: miniaturyzacja, nowe materiały, 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. "Badania wpływu warunków drażenia elektroerozyjnego trepanacyjnego na efekty obróbki".**

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 doktorant zajął stanowisko odnośnie podawanych informacji lub podjął się ich krytycznej oceny, chociażby w kontekście podjętego tematu pracy, co wzmocniłoby jego wybór. W największym stopniu uwaga ta dotyczy opisanych badań z zastosowaniem różnego rodzaju proszków do dielektryka mających na celu poprawę SGP drażonych powierzchni i wydajności obróbki a także zmniejszenie zużycia 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 łącznie z trendami proekologicznymi. Należy także dodać, że dobór źródeł jest poprawny. Zawiera on 107 pozycji z czego, co należy podkreślić, 10 publikacji jest współautorskich związanych z tematyką rozprawy. Istnieje jednak w wykazie pozycja ([52]), do której Autor się nie odwołał. Pewnym mankamentem tej części pracy jest brak cytowanej literatury z ostatnich dwóch lat tzn. lata 2014 i 2015. Należy przy tym podkreślić, że w roku 2015 odbyła się cyklicznie organizowana konferencja EM'15 (Electromachining) skupiająca specjalistów z ośrodków naukowych i z przemysłu zajmujących się zagadnieniami obróbek niekonwencjonalnych.

Podsumowanie przeglądu literatury zawarte jest w pkt. 1.3 „Kierunki oraz ogólne tendencje badań obróbki EDM. Autor wskazuje w nim czynniki wejściowe i wynikowe, mające wpływ na efekty obróbki elektroerozyjnej oraz stwierdza, że „zagadnienia dokładności obróbki elektroerozyjnej nie stanowią przedmiotu

szerszych badań” i dalej, że te badania dokładności dotyczyły głównie obróbki WEDM, a w przypadku drążenia otworów dotyczyły otworów o średnicach od 0,1 do 3,0 mm. Moim zdaniem 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 ocenę wpływu dokładności wykonania kształtu otworów oraz wydajności obróbki w zależności od zastosowanego rodzaju elektrody roboczej oraz sposobu przepłukiwania szczeliny roboczej. 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 stosowanego na elementy robocze tłoczników. Użyty w eksperymencie materiał na elektrody (elektrodę roboczą i próbkę) został przez Autora pracy uzasadniony. Wyniki badań zaprezentowano w rozdziale 5. W wyniku badań otrzymano wpływ: amplitudy prądu drążenia, czasu przerwy, czasu impulsu i kierunku przepływu cieczy roboczej na chropowatość powierzchni, wydajność procesu, mikrostrukturę powierzchni, zużycie elektrody i dokładność wymiarową otworu. Poszczególne sekwencje badań Autor podsumowuje w postaci komentarzy wyjaśniających uzyskane wyniki.

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

Uważam, że rozdział 4 stanowi najważniejszą część pracy i z nim wiąże się znaczący i oryginalny wkład mgr inż. Dominika Dudka w rozwój technologii drążenia trepanacyjnego otworów o zarysie obrotowym.

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

- Zbyt skromnie opisane i niezilustrowane w postaci wykresów czy tabel badania wstępne. Zdaniem oceniającego badania wstępne obok określenia zakresu zmienności czynników wejściowych, co w pracy doktorant zadeklarował, powinny określić wagi wpływu wielkości wejściowych na wyjściowe. Umożliwia to analizę większej ilości czynników i pominięcie w badaniach zasadniczych tych wielkości wejściowych, których wpływ okaże się nieistotny.
- Brak oceny istotności współczynników równań regresji przyjętych przez Autora pracy w postaci wielomianu kwadratowego, zawierającego wzajemne interakcje poszczególnych parametrów wejściowych obróbki.
- W opinii oceniającego dodatkowych wyjaśnień wymagają uzyskane wartości współczynników korelacji  $R$  (tab. 5.7, 5.16, 5.17) w większości przypadków do 0,7 definiowanych jako umiarkowane lub gorzej.
- Brak kontroli warunków hydrodynamicznych panujących w szczelinie międzyelektrodowej w przypadku, gdy jako jeden z czynników wejściowych w badaniach przyjęto kierunek przepływu cieczy roboczej. Zdaniem oceniającego pomiar chociażby ciśnienia lub podciśnienia w układzie z odsysaniem cieczy roboczej, a w ogólności utrzymanie stałej różnicy ciśnień jest warunkiem podstawowym w przypadku badań porównawczych

- tych dwóch sposobów zasilania strefy obróbki. Nie bez przyczyny badania w układzie z odsysaniem elektrolitu wypadły w zasadzie w każdym przypadku gorzej.
- Uwaga ta w pewnym zakresie łączy się z wcześniejszą. Autor pracy tłumaczy dwukrotnie wyższą uzyskaną wydajność objętościową procesu dla układu z wtłaczaniem elektrolitu lepszym przepłukiwaniem szczeliny międzyelektrodowej (83<sup>12</sup>), lepkością elektrolitu (83<sub>10</sub>) i małą odległością pomiędzy elektrodami (83<sub>9</sub>). Zakładając, że szczelina międzyelektrodowa zasilana jest tą samą różnicą ciśnień zmiany warunków hydrodynamicznych, czyli przepłukiwania szczeliny, można doszukiwać się w zmienności jej grubości, ale zdaniem oceniającego istotny wpływ mają lokalne straty przepływu, które dla różnych kierunków podawania cieczy roboczej mogą być inne. Zwrócić należy uwagę, że przy zadanym podciśnieniu, które nie jest znane recenzentowi, łatwiej może zaistnieć zjawisko kawitacji w szczelinie roboczej co jest przyczyną uszkodzeń powierzchni.
  - W opinii oceniającego dodatkowym, ważnym i miarodajnym wskaźnikiem oceny badanej technologii byłaby analiza położenia osi zmierzonego otworu względem bazy technologicznej np. dolnej powierzchni próbki walcowej. Autor pracy przyjął do oceny zarysu walcowości odchyłkę określaną jako największa odległość punktów powierzchni rzeczywistej od powierzchni walca przylegającego w granicach obszaru cząstkowego. Podejście takie jest jak najbardziej poprawne, ale mierzone parametry odnoszone są do wyznaczonego walca odniesienia, którego oś może być pochylona względem wcześniej przytoczonej bazy technologicznej. Przyczyn pochylecia osi może być kilka np. nierównomiernie zużywająca się elektroda lub niesymetryczne warunki hydrodynamiczne panujące w szczelinie roboczej.

W podsumowaniu pracy (rozdział 6) 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. Należy jednak dodać, że wnioski końcowe są czasami powtórzeniem wcześniejszych uwag dotyczących rezultatów badań. W przypadku wniosku pierwszego ma miejsce traktowanie informacji literaturowych (27<sup>1</sup> + 27<sup>2</sup>) tak samo jak wyników własnych. Natomiast wniosek czwarty mówiący o tym, że „wtłaczanie cieczy roboczej do szczeliny międzyelektrodowej umożliwia pokonywanie oporów hydraulicznych wynikających z jej lepkości, co z kolei skutkuje intensywniejszym przepłukiwaniem szczeliny i odprowadzaniem produktów erozji, w efekcie następuje poprawa geometrii drążonego otworu” jest oczywisty i w części dotyczącej hydrodynamiki przepływu cieczy nie poparty badaniami.

Autor pracy nie ustrzegł się błędów stylistycznych, interpunkcyjnych i edytorskich, które nie umniejszają w znaczący sposób dokonań doktoranta np.: na str. 11<sub>13</sub>, 13<sub>16,15,14,5</sub> 14<sup>7</sup><sub>7</sub>, 17<sub>12,7</sub>, 22<sub>20</sub>, 23<sup>9</sup>, 26<sub>16</sub>, 38<sub>11,7</sub>, 45<sub>14,6</sub>, 73<sup>10</sup>, 75<sup>6,14</sup><sub>2,8</sub>, 106<sub>4</sub>, 119<sup>5,14,17,18</sup>, 93<sup>4</sup><sub>8</sub>, 122<sub>4</sub>, 126<sup>2</sup><sub>7,3</sub>, 129<sup>6</sup>, 131<sub>16,15</sub>, 134<sub>9,4</sub>.

Pomimo tych błędów należy podkreślić dużą staranność pracy.

### **Wniosek końcowy**

W podsumowaniu niniejszej recenzji należy stwierdzić, że pomimo wykazanych uchybień rozprawa doktorska zawiera elementy wartościowe pod względem poznawczym i użytecznym. 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. Dominika Dudka, 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 Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej.

Tomasz Paszkowski