

Łódź, dn. 22.11.2021 r.

dr hab. inż. Marcin Gołąbczak, prof. PŁ
Politechnika Łódzka

Recenzja
pracy doktorskiej mgr inż. Jarosława Buka
pt.: „Wpływ parametrów procesu wycinania elektroerozyjnego na dokładność kształtu
i jakość powierzchni zamka tarczy turbiny”

*Recenzja opracowana na zlecenie (pismo z dnia 30.09.2021) Sekretarza Rady Dyscypliny Inżynieria
Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej dr hab. inż. Pawła Wosia, prof. PRz*

1. Ocena wyboru tematu

Obróbka elektroerozyjna WEDM (Wire Electrical Discharge Machining) jest powszechnie stosowana w wielu procesach wytwarzania precyzyjnych i skomplikowanych geometrycznie elementów maszyn, zwłaszcza wykonywanych z trudnoskrawalnych materiałów konstrukcyjnych o dużej twardości i wytrzymałości. Zalety tej obróbki ujawniają się zwłaszcza w jej szerokich możliwościach technologicznych (np.: obróbka łopatek turbin i sprężarek, korpusów silników turbinowych, skomplikowanych form, matryc) oraz wysokiej produktywności tego sposobu obróbki. Realizowane aktualnie prace badawcze, zarówno w krajowych jak i zagranicznych ośrodkach naukowo-badawczych, koncentrują się na doskonaleniu procesu obróbki WEDM oraz zwiększaniu obszarów jej przemysłowego zastosowania.

Opiniowana rozprawa doktorska wpisuje się w nurt tych badań, ponieważ dotyczy ustalenia wpływu parametrów procesu wycinania elektroerozyjnego na dokładność kształtu i jakość powierzchni zamka tarczy turbiny. Oceniam zatem wybór tematu rozprawy za aktualny i ważny, zarówno pod względem poznawczym, jak i aplikacyjnym.

2. Merytoryczna ocena rozprawy

Rozprawa doktorska opracowana jest w postaci monografii zawierającej 145 stron tekstu, w tym: 136 rysunków i 39 tabel. Jej zasadniczą treść poprzedza spis treści, streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz ważniejszych symboli i akronimów, po których następuje 6 rozdziałów merytorycznych z wydzielonymi podrozdziałami oraz podsumowanie i wnioski końcowe. Pracę zamyka spis literatury zawierający 119 pozycji bibliograficznych.

Przyjęty układ rozprawy, jej podział na rozdziały i podrozdziały mają typową narrację dla prac doktorskich. Strukturę pracy oceniam jako przejrzystą i poprawną.

Wprowadzenie zawiera wzmianki o rozwoju obróbki elektroerozyjnej WEDM oraz możliwościach jej zastosowania do kształtowania materiałów trudnoobrabialnych z grupy superstopów HRSA, m.in. nadstopów niklu, które są stosowane również w przemyśle lotniczym. Wskazano tutaj zalety obróbki WEDM oraz zasygnalizowano problem badawczy podejmowany w rozprawie doktorskiej.

Rozdział drugi zawiera skrótowy przegląd literatury dotyczącej metod obróbki zamków tarcz łopatkowych. We wstępie do tego rozdziału przedstawiono budowę zespołu wirnikowego turbiny, przykłady rozwiązań konstrukcyjnych zamków łopatek tarcz oraz stawiane im wymagania konstrukcyjne i wytrzymałościowe. W dalszej jego części przedstawiono skrótowo przegląd sposobów obróbki zamków, obejmujący: przeciąganie, frezowanie, szlifowanie, obróbkę elektrochemiczno-ścierną, elektrochemiczną, elektroerozyjną, wycinanie elektroerozyjne WEDM oraz obróbkę wodno-ścierną. W zakończeniu rozdziału przedstawiono syntetyczną analizę wad i zalet omawianych metod obróbki zamków. Na podstawie przedstawionej analizy wykazano istotny potencjał możliwości obróbki zamków metodą WEDM, w porównaniu do innych sposobów obróbki.

Rozdział trzeci zawiera obszerny przegląd literatury (41 str.), dotyczącej procesów wycinania elektroerozyjnego. W poszczególnych podrozdziałach przedstawiono: Parametry technologiczne procesu wycinania elektroerozyjnego (3.1), Podstawy fizykalne procesu wycinania elektroerozyjnego (3.2), Problemy i ograniczenia procesu wycinania elektroerozyjnego (3.3), Właściwości i zastosowanie stopu Inconel 718 (3.4), Obrabialność stopu Inconel 718 (3.4), Podsumowanie stanu badań wycinania elektroerozyjnego (3.6). Prezentowa analiza literatury właściwie odzwierciedla aktualny stan badań nad procesem wycinania elektroerozyjnego, zamieszczone materiały źródłowe są właściwie dobrane, a ich prezentacja nie budzi zastrzeżeń. Uwagi szczegółowe do tego rozdziału dotyczą natomiast:

- zbyt skrótowego przedstawienia fizycznych podstaw procesu wycinania elektroerozyjnego. Nie przedstawiono bowiem zarówno modelu fizycznego procesu WEDM, jak i warunków niezbędnych do zaistnienia tego procesu elektroerozyjnego oraz możliwości zastosowania nowych płynów dielektrycznych, w tym np. dielektryków gazowych,
- nieuwzględnienia wśród kryteriów oceny jakości powierzchni po wycinianiu elektroerozyjnym stanu naprężeń własnych w technologicznej warstwie wierzchniej,

- podsumowania, w którym nie sformułowano konkretnych wniosków wynikających z analizowanej literatury oraz uzasadniających celowość podjęcia tematu rozprawy doktorskiej.

Rozdział czwarty przedstawia cel, tezę i zakres pracy. Oceniam, że zarówno cel pracy, jak i jej teza, sformułowane są zbyt ogólnikowo. W celu pracy nie określono bowiem jaki (który) dosuw będzie zmieniany: „*Celem niniejszej pracy jest określenie wpływu wielkości dosuwu, natężenia i napięcia wyładowania, czasu przerw między wyładowaniami oraz energii wyładowania w procesie wycinania elektroerozyjnego* „

Dyskusyjnym jest zapis w celu pracy dotyczący zmiany energii wyładowania w procesie wycinania elektroerozyjnego (w jaki sposób będzie dokonywana zmiana energii wyładowań?). Cel pracy nie ujawnia, jakie wartości poznawcze i użytkowe będą osiągnięte w realizowanych badaniach.

Sformułowana teza naukowa rozprawy jest tylko ogólnikową hipotezą, bardzo trudną do jednoznacznego udowodnienia na podstawie realizowanych badań. Autor nie ujawnia sposobu jej weryfikacji w realizowanych badaniach doświadczalnych.

Zakres pracy obejmuje 5 zadań badawczych, spośród których najbardziej rozbudowane jest zadanie dotyczące badań doświadczalnych. Dyskusyjnym jest zadanie pierwsze: „*Zaprojektowanie zarysu zamka jodelkowego i przygotowanie modelu*”, ponieważ w pracy nie umieszczono projektu modelu zamka, natomiast zamieszczono tylko uproszczony rysunek zarysu zamka (rys. 5.10).

Rozdział piąty zatytułowany: *Badania doświadczalne*, zawiera w rzeczywistości opisy obiektu badań, stanowiska badawczego i urządzeń pomiarowych oraz metodykę pomiarów, analizy statystyczne wyników badań i warunki badań. Obiekt badań doświadczalnych opracowano w postaci logicznego schematu, na którym właściwie wyodrębniono jego wielkości wejściowe, wyjściowe i zakłócające oraz warunki ograniczające. Opisano stanowisko badawcze, którego zasadniczą częścią jest czteroosiowa wycinarka elektroerozyjna CNC Mitsubishi FA10S oraz podano jej parametry techniczne. Niedosyt budzi brak oznaczeń i opisów aparatury pomiarowej zainstalowanej na stanowisku badawczym oraz charakterystyki technicznej stosowanych w badaniach doświadczalnych generatorów HP, MP i LC. Przedstawiono następnie skrótową metodykę pomiarów dokładności kształtu i struktury geometrycznej powierzchni wycinanych profili zamka oraz grubości i twardości warstwy wierzchniej (5.2.2÷5.2.3).

W dalszej części tego rozdziału przedstawiono zastosowane analizy statystyczne wyników badań doświadczalnych (5.2.4), warunki badań doświadczalnych realizowanych

w dwóch etapach oraz plany badań doświadczalnych (5.3). Dyskusyjnym jest przyjęta w badaniach wielomianowa postać funkcji do opisu modeli uzyskiwanych wyników badań, która ma ograniczoną przydatność praktyczną.

Rozdział szósty zawiera prezentację wyników badań doświadczalnych oraz ich omówienie. W podrozdziale 6.1 zestawiono wyniki badań struktury geometrycznej powierzchni po wycinaniu WEDM z wykorzystaniem dwóch różnych generatorów, oznaczonych w pracy akronimami: HP, MP i LC. Prezentowane wyniki badań obejmują: zestawienia tabelaryczne chropowatości powierzchni Ra (Tab. 6.1÷6.3), wykresy przewidywanych i rzeczywistych chropowatości powierzchni Ra (Rys. 6.2, 6.6, 6.11, 6.14, 6.20, 6.24), równania regresji chropowatości powierzchni Ra w funkcji zmian dosuwu elektrody, napięcia i natężenia prądu generatora (6.1÷6.5), wykresy chropowatości powierzchni w funkcji zmian dosuwu elektrody, napięcia i natężenia prądu generatora (Rys. 6.3÷6.5, 6.7, 6.12, 6.13, 6.15, 6.21÷6.23, 6.25), przykładowe wykresy struktury geometrycznej powierzchni 3D i nośności powierzchni (Rys. 6.8, 6.9, 6.16, 6.17, 6.26, 6.27) oraz przykładowe obrazy SEM warstwy wierzchniej po wycinaniu WEDM (Rys. 6.10, 6.18, 6.28). Zamieszczono także wykres ilustrujący porównanie zakresów chropowatości powierzchni Ra , uzyskiwanych w procesach wycinania WEDM z zastosowaniem trzech różnych generatorów: HP, MP i LC oraz przykładowe obrazy SEM i wykresy twardości warstwy wierzchniej (Rys. 6.30÷6.35).

W podrozdziale 6.2 zestawiono wyniki dokładności kształtu zamka po obróbce WEDM, z wykorzystaniem generatorów HP, MP i LC, które obejmują ocenę dokładności obróbki wykończeniowej WEDM z wykorzystaniem generatora HP, MP i LC. Wyniki badań dokładności kształtu przedstawiono w postaci tabelarycznej (Tab. 6.6÷6.8, 5.29?, 6.11÷6.15), równań regresji 6.7÷6.12, wykresów przewidywanych i rzeczywistych dokładności kształtu (Rys. 6.36, 6.40, 6.43), wykresów ilustrujących zależność dokładności kształtu profilu od warunków obróbki (6.37÷6.39, 6. 41, 6.42, 6.44÷6.46, 6.48÷6. 50, 6.52÷6.54). Zamieszczono także wykresy ilustrujące porównanie zakresów dokładności odchyłek kształtu i linii zamka (Δr i Δd), uzyskiwanych w procesach wycinania WEDM z zastosowaniem generatorów HP, MP i LC. Prezentowane wyniki badań są na ogół czytelnie przedstawione i poprawnie interpretowane. Uwagi szczegółowe do tego rozdziału dotyczą:

- błędnej numeracji tabeli 5.29,
- stosowania w opisie badań niefortunnnych sformułowań i określeń, np. na str. 90: „Przedstawione modele ... efektów dwuczynnikowej interakcji, efektów kwadratów zmiennych oraz efektu sześcianu jednej zmiennej (dosuwu z).”; str. 115: „Niska jakość dopasowania, wynikająca z niskich współczynników determinacji ...”,

- wyjaśnienia metodyki ustalania wartości i sposobu ustawiania wartości energii impulsów wyładowań iskrowych E , w poszczególnych próbach eksperymentu planowanego,
- wyjaśnienia fizycznej interpretacji wykresów pomiaru twardości próbek, zwłaszcza w strefie ujemnych odległości od granicy warstwy białej, np. rysunki 6.32÷6.34,
- braku konkluzji lub wniosków szczegółowych w zakończeniu poszczególnych podpunktów analizowanych wyników badań.

Rozdział siódmy zawiera podsumowanie i wnioski końcowe, które pogrupowano względem kryterium jakości i dokładności powierzchni. Sformułowane wnioski końcowe mają różny stopień ważności i szczegółowości. Niedosyt budzi brak ich podziału na poznawcze i utylitarne. Niektóre wnioski są zbyt szczegółowe lub ogólnikowe i dyskusyjne: np.: „Zastosowanie generatora HP w pierwszym przejściu wykończeniowym nie pozwoliło uzyskać chropowatości R_a mieszczącej się w wymaganym zakresie wartości.”; „Zmierzone wartości chropowatości powierzchni R_a wykraczają poza zakres podawany przez producenta obrabiarki ...”; „W drugim przejściu wykończeniowym zmiana nastaw parametrów, przy aktywnym generatorze LC, nie zmieniała rozkładu odchyłek kształtu profilu Δd w żadnej próbie.”; „Układ pomiarowy umożliwił rejestrację fizycznych wartości badanych parametrów, które w przeciwieństwie do nastaw, pozwoliły uzyskać modele możliwe do zastosowania również na innych obrabiarkach.”

Stwierdzam, że prezentowane wnioski na ogół potwierdzają osiągnięcie przez Doktoranta zamierzonych celów naukowych rozprawy.

Rozdział 8. Literatura - zawiera 118 pozycji bibliograficznych pochodzących z artykułów w czasopismach krajowych i zagranicznych, referatów zamieszczonych w materiałach konferencji zagranicznych i krajowych oraz monografii, książek i podręczników. Wśród zamieszczonej literatury 39 pozycji pochodzi z okresu ostatnich 6 lat (co stanowi około 33%). Należy podkreślić, że w literaturze występuje sześć współautorskich publikacji Doktoranta. Poszczególne pozycje bibliograficzne są na ogół właściwie dobrane i poprawnie cytowane w tekście monografii.

3. Ocena strony redakcyjnej

Oceniając rozprawę doktorską pod względem redakcyjnym warto zauważyć, że tytuł rozprawy odzwierciedla jej treść, układ pracy oraz jej podział na rozdziały i podrozdziały są poprawne. Rozprawa napisana jest na ogół poprawnie pod względem językowym. Zamieszczone w rozprawie rysunki, wykresy i fotografie są czytelne i starannie opracowane. Doktorant nie ustrzegł się jednak błędów gramatycznych, interpunkcyjnych, błędnych

sformułowań stylistycznych oraz innych uchybień edytorskich. Poniżej przytoczono przykłady takich błędów:

- str. 9 - brak opisu w języku polskim niektórych akronimów, np.: CBM, HP, HSTR, LC, MP, SMWE, VIPER;
- rozpoczynanie zdań od skrótów, np.: str. 22⁶ „*W tab. 2.1 przedstawiono ...*”; str. 36⁶ „*Na rys. 3.18 przedstawiono ...*”; str. 40¹⁰ „*W tab. 3.1 przedstawiono ...*”; str. 46⁴ „*Na rys. 3.26 przedstawiono ...*”; str. 82⁴ „*Na rys. 5.11 przedstawiono ...*”; str. 121⁴ „*W tab. 6.8 przedstawiono ...*”; str. 134¹ i 134⁷ „*Na rys. 6.59 przedstawiono ...*”;
- stosowania dużej litery po dwukropku, np.: str. 65¹⁸, 65¹⁸;
- stosowanie nieadekwatnych lub dyskusyjnych określeń i sformułowań, np.: w opisach tabel 5.8÷5.10 nie podano jednostek oraz stosowano określenie „*ilość*” - zamiast „*liczba*”; str. 41⁶ „*Napięcie wyladowania pozostaje niemal niezmiennie natomiast natężenie prądu podczas wyladowania jest zmienne ...*”; str. 41⁵ „*Rozkład odpowiadał rozkładowi parametrów R_a i R_q .*”; str. 83² „*Po wykonaniu prób cięcia nastawy zamieniono na wielkości fizyczne.*”; str. 85¹ „*Po wykonaniu badań wstępnych nastawy zastąpiono wielkościami fizycznymi.*”; str. 114⁶ „*Znaczne różnice pomiędzy rozpiętością rejestrowanych wartości oraz wielkościami pudelek ...*”

Stwierdzam, że rozprawa doktorska wnosi istotne wartości poznawcze i aplikacyjne z obszaru doskonalenia procesu wycinania WEDM. Zawarte w recenzji uwagi krytyczne dotyczą m.in. edycji pracy i mają charakter dyskusyjny, do których Doktorant może odnieść się podczas publicznej obrony.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam:

- opracowanie metodyki badań oraz stanowiska badawczego do realizacji procesu wycinania elektroerozyjnego WEDM zamka tarczy turbiny,
- wykonanie badań eksperymentalnych dotyczących ustalenia wpływu dosuwu elektrody i parametrów elektrycznych generatora w procesie wycinania elektroerozyjnego WEDM zamka tarczy turbiny na dokładność jego kształtu i chropowatość powierzchni,
- opracowanie zbioru równań regresji i modeli opisujących chropowatość powierzchni i dokładność kształtu zamka tarczy turbiny w procesie wycinania elektroerozyjnego WEDM,
- sformułowanie wniosków o znaczeniu poznawczym i użytkowym, dotyczących doskonalenia technologii wycinania elektroerozyjnego zamka tarczy turbiny.

4. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Jarosława Buka zawiera samodzielne opracowanie zagadnienia naukowego. Autor wykazał się wymaganą wiedzą, sumiennością i umiejętnością prowadzenia badań naukowych oraz przedstawiania wyników.

Na podstawie przedstawionej oceny stwierdzam, że opiniowana praca mgr inż. Jarosława Buka spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w: art. 14 ust. 1 oraz ust. 2 pkt. 2 i art. 12 ust. 1 i 2 Ustawy z dn. 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789 ze zm.) oraz § 3 ust. 1 i § 6 ust. 1-2 rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dn. 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r., poz. 261), w związku z art. 179 ust. 1-3 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1669 ze zm.) i rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych (Dz. U. z 2018 r., poz. 1818).

Rozprawa doktorska mgr inż. Jarosława Buka może stanowić podstawę do ubiegania się o stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Jarosława Buka do publicznej obrony przedstawionej rozprawy doktorskiej.

Biorąc pod uwagę kompleksowość przeprowadzonych badań doświadczalnych, wartościowe wyniki badań oraz współautorstwo sześciu publikacji, wnioskuje o wyróżnienie opiniowanej rozprawy doktorskiej mgr inż. Jarosława Buka.



dr hab. inż. Marcin Gołąbczak, prof. PŁ

Łódź, dn. 22.11.2021 r.