

Łódź, dn. 17.12.2018 r.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Gołabczak
Politechnika Łódzka

Recenzja
pracy doktorskiej mgr inż. Michała Marcza
pt.: „Magnetyczno-ściernie wygładzanie powierzchni”

Recenzja opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej
Prof. dr hab. inż. Andrzeja Kolasy, z dn. 29.11.2018r.

1. Ocena wyboru tematu

Obróbka magnetyczno-ścierna jest sposobem, w którym następuje formowanie narzędzia ściernego w wyniku oddziaływania ferromagnetycznych ziaren ściernych z zewnętrznym polem magnetycznym. Zaletami tego sposobu obróbki jest stały udział ilościowy ziaren ściernych w kontakcie z powierzchnią obrabianą oraz elastyczność narzędzia ściernego w dopasowaniu się do kształtu obrabianej powierzchni. Z tych powodów możliwości jej celowego zastosowanie koncentrują się na operacjach polerowania, wygładzania i usuwania zadziorów w trudnodostępnych powierzchniach kształtowych, których wykonanie tradycyjnymi sposobami obróbki ścierniej jest niemożliwe lub bardzo trudne.

Doktorant podjął się w rozprawie doktorskiej rozwiązania zadania, jakim było określenie wpływu wybranych parametrów procesu obróbki magnetyczno-ścierniej, w szczególności wpływu wartości lokalnej indukcji magnetycznej w szczelinie roboczej, na wybrane parametry chropowatości obrobionej powierzchni. Istotną częścią pracy jest modelowanie matematyczne obwodu magnetycznego do wytworzenia indukcji w strefie obróbki, opracowanie konstrukcji magnetowodu oraz aplikacja tego sposobu obróbki do m.in. wygładzania i czyszczenia powierzchni spoin doczołowych elementach rurowych.

Biorąc pod uwagę zakres zrealizowanych zadań badawczych, ich interdyscyplinarność oraz znaczenie poznawcze i użyteczne, oceniam wybór tematu rozprawy za oryginalny i istotny w technologii maszyn oraz spełniający wymagania stawiane pracom doktorskim.

2. Ocena rozprawy

Rozprawa doktorska opracowana jest w postaci monografii zawierającej 171 stron, w tym: 158 rysunków i 34 tabele. Jej zasadniczą treść poprzedzają: podziękowania, streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści i wykaz ważniejszych oznaczeń, po którym następuje 10

rozdziałów merytorycznych z wydzielonymi podrozdziałami oraz podsumowanie i wnioski końcowe. Pracę zamyka spis literatury zawierający 118 pozycji literatury zasadniczej oraz 9 pozycji literatury uzupełniającej. W pracy nie zamieszczono spisu rysunków i tabel. Przyjęty układ rozprawy, podział na rozdziały i podrozdziały ma typową narrację dla prac doktorskich, który oceniam jako przejrzysty i poprawny.

W **rozdziale pierwszym** „*Wstępna analiza zagadnienia*” Doktorant przytacza historyczne wzmianki o praktycznym wykorzystaniu materiałów o właściwościach magnetycznych oraz informacje o współczesnych zastosowaniach pola magnetycznego w różnych dziedzinach techniki, w tym także w technologii maszyn jako obróbki magnetyczno-ścierniej. Charakteryzuje następnie istotę wygładzania magnetyczno-ściernego powierzchni przedmiotów o skomplikowanym kształcie za pomocą ziaren ściernych w polu magnetycznym, przytacza właściwości ferromagnetyczne ziaren ściernych oraz czynniki determinujące siłę oddziaływującą na ziarno ściernie w tym procesie obróbki. Niedosyt budzi pominięcie w tym rozdziale podstawowych problemów badawczych podejmowanych w rozprawie doktorskiej.

Rozdział drugi zawiera przegląd literatury dotyczącej stanu badań nad obróbką magnetyczno-ścierną, który obejmuje dwa podrozdziały: zjawiska fizyczne zachodzące w szczelinie obróbkowej (pkt. 2.1) oraz możliwości zastosowania obróbki magnetyczno-ścierniej (pkt. 2.2). W punkcie 2.1 przedstawiono podstawowe czynniki wpływające na intensywność procesu wygładzania magnetyczno-ściernego, metody otrzymywania ferromagnetycznych ziaren ściernych, ich właściwości użytkowe w procesach wygładzania oraz scharakteryzowano właściwości fizyko-chemiczne obrabianych materiałów. W punkcie 2.2 omówiono prezentowane w literaturze stanowiska badawcze do obróbki magnetyczno-ścierniej oraz porównano technologiczne parametry obróbki magnetyczno-ścierniej i uzyskiwane chropowatości powierzchni. Szczególnie szeroko omówiono problemy obróbki magneto-reologiczno-przetłoczno-ścierniej (str. 38÷49), które są tylko pośrednio związane z tematem rozprawy.

Doktorant zadowalająco przedstawił wyniki badań literaturowych, dotyczące zastosowania obróbki magnetyczno-ścierniej do walcowych powierzchni wewnętrznych i zewnętrznych oraz powierzchni swobodnych. Uwagi odnośnie tego rozdziału dotyczą braku podsumowania i wniosków wynikających z przeprowadzonej analizy literatury.

Rozdział trzeci zawiera 4 podrozdziały dotyczące: uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej (pkt. 3.1), celów pracy (pkt. 3.2), tezy pracy (pkt. 3.3) i zakresu pracy (pkt. 3.4). Te bardzo skrótowo ujęte podrozdziały powinny być zamieszczone pod jednym tytułem: *Cel, teza i zakres badań*. Niedosyt budzi brak podstawowego celu naukowego rozprawy, a zamieszczone w tym

rozdziale 4 cele szczegółowe sformułowane są ogólnikowe i budzą wątpliwości interpretacyjne. Dotyczy to w szczególności:

- cel nr 1 - brak uszczegółowienia parametrów (wielkości wejściowych) procesu obróbki magnetyczno-ściernej oraz wielkości wyjściowych (parametrów oceny stanu warstwy wierzchniej),
- cel nr 2 - nie ujawniono jakie charakterystyki obwodu magnetycznego będą wyznaczane oraz nie podano po co je wyznaczano,
- celu nr 3 - w oparciu o jakie kryterium wyznaczane będą najkorzystniejsze parametry obróbki?
- cel nr 4 - na czym polega analiza elastycznego narzędzia oraz jakie zjawiska fizyczne będą analizowane?

Podobne uwagi dotyczą także tezy pracy, którą sformułowano również ogólnikowo. Przyjęty zakres pracy nie pokrywa się z celami pracy. Dyskusyjnym jest zamieszczenie w zakresie pracy analizy literatury, bowiem ten etap pracy powinien być przeprowadzony przed sformułowaniem celu pracy.

Rozdział czwarty - "*Stanowisko badawcze*" - zawiera symulacje numeryczne dotyczące: rozkładu pola magnetycznego i indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej, koncentracji energii i rozproszenie pola magnetycznego, modelowania stanowiska oraz weryfikacji modelu numerycznego z rzeczywistymi charakterystykami na stanowisku badawczym.

Przeprowadzone modelowanie oraz symulacje numeryczne są przeprowadzone poprawnie i należy je uznać za istotne osiągnięcie naukowe Doktoranta. Dyskusyjnym jest natomiast tytuł podrozdziału 4.1.5, który zawiera tylko schemat stanowiska badawczego oraz tytuł rozdziału 4, ponieważ nie napotkano w nim na opisów wykorzystywanych stanowisk badawczych oraz innych urządzeń pomiarowych. Niedosyt budzi brak sformułowania wniosków wynikających z przeprowadzonych symulacji numerycznych i modelowania. W tym rozdziale brakuje również opisu wykorzystywanych stanowisk badawczych i innych urządzeń pomiarowych.

Rozdział piąty zatytułowany: "*Metodyka badań, metody i techniki pomiarowe*" zawiera bardzo skrótową informację o przeprowadzeniu trzech etapów badań doświadczalnych (około 3/4 strony). Nie podano natomiast istotnych informacji o stosowanej metodyce badań, obszarach zmienności wielkości wejściowych, standaryzacji wielkości wejściowych, kroku próby oraz nie zdefiniowano wielkości wyjściowych. Wspomniano tylko, że w pierwszym etapie badań będzie stosowany pięciopoziomowy, trójczynnikiowy, rotatabilny eksperyment planowany.

Rozdział szósty zawiera wyniki badań doświadczalnych dotyczące obróbki magnetyczno-ścierniej stali nierdzewnej 304L głowicą nieruchomą (pkt. 6.1) oraz obróbki magnetyczno-ścierniej stali 1.4542 i stopu tytanu Grade 5A głowicą ruchomą (pkt. 6.2).

We wstępie do podrozdziału 6.1 Doktorant zamieścił tylko jednozdaniową informację o stanowisku badawczym: *"Badania zostały przeprowadzone na stanowisku do obróbki magnetyczno-ścierniej własnej konstrukcji (rys. 96)"*, co utrudnia obiektywną ocenę stanowiska. Dyskusyjnym jest m.in.: dobór wielkości wejściowych i przedziałów ich zmienności, rodzaju materiału ściernego, wymiaru ziaren ściernych oraz dobór czasu obróbki (nie podano bowiem żadnej pozycji literaturowej). Wyjaśnienia wymaga sposób doprowadzenia do przestrzeni roboczej ziaren ściernych o zmiennej koncentracji (16%, 30%, 70%). Na wykresie ilustrującym przestrzeń eksperymentu planowanego (rys. 98) nie opisano osi współrzędnych. W tabelach 16 i 21 nie podano procentowej zawartości żelaza.

Badania eksperymentalne procesu wygładzania stali nierdzewnej 304L głowicą nieruchomą realizowano według pięciopoziomowego trójczynnika rotabilnego eksperymentu planowanego. Nie podano jednak liczby powtórzeń prób eksperymentalnych oraz miar rozrzutu uzyskiwanych wyników pomiaru. Wyniki badań przedstawiono w postaci równań regresji, przykładowych charakterystyk parametrów chropowatości powierzchni oraz 2 tabel i obrazów SEM stereometrii powierzchni, ilustrujących porównanie próbek przed i po obróbce magnetyczno-ścierniej. Niedosyt budzi brak poszerzonej dyskusji o uzyskanych wynikach badań. Pojawia się m.in. np. pytanie: dlaczego wzrost koncentracji ziaren ściernych i czasu obróbki tak znacząco pogarsza parametry chropowatości powierzchni? W zakończeniu tego etapu badań nie sformułowano wniosków wynikających z uzyskanych wyników badań.

Badania eksperymentalne procesu wygładzania stali 1.4542 głowicą ruchomą (pkt. 6.2) oraz stopu tytanu realizowano według dwupoziomowego ortogonalnego planu badań. Podobnie jak w pkt. 6.1 nie podano szerszego opisu stanowiska badawczego do wygładzania głowicą ruchomą. Dyskusyjnym jest również dobór wielkości wejściowych i obszarów ich zmienności.

Wyniki badań dotyczące wygładzania stali 1.4542 głowicą ruchomą (pkt. 6.2.1) przedstawiono w postaci równań regresji, trzech wykresów ilustrujących wpływ wybranych parametrów wygładzania (v_f , n) na chropowatość powierzchni (Sa , St i Sz) oraz przykładowe obrazy stereometryczne (SEM) wygładzanych powierzchni. Dodatkowo zamieszczono analizę składu chemicznego tzw. warstwy "białej" oraz wyniki pomiaru mikrotwardości tej warstwy wierzchniej.

Wyniki badań dotyczące wygładzania magnetyczno-ściernego stopu tytanu (pkt. 6.2.2) przedstawiono w postaci tabeli wyników pomiaru parametrów chropowatości oraz trzech równań

regresji i przykładowych wykresów ilustrujących wpływ warunków dogładzania na wybrane parametry oceny chropowatości powierzchni (Sa , Sds , St). Uwagi dotyczące podrozdziału 6.2 dotyczą braku poszerzonej dyskusji o uzyskanych wynikach badań oraz sformułowania wniosków z tej części badań.

W rozdziale siódmym przedstawiono stanowisko badawcze oraz przykładowe wyniki badań dotyczące zastosowania obróbki magnetyczno-ścierniej do wygładzania wewnętrznych powierzchni rurowych spawanych doczołowo. Zakres tych badań obejmował wygładzanie powierzchni wewnętrznych spoin doczołowych w elementach wykonanych ze stali nierdzewnej, stopu aluminium oraz mosiądzu. Prezentowane wyniki badań potwierdzają istotną poprawę parametrów chropowatości powierzchni tych spoin po obróbce magnetyczno-ścierniej.

Rozdział ósmy zawiera przykłady aplikacji obróbki magnetyczno-ścierniej do wygładzania powierzchni krzywoliniowym, w tym do: regeneracji kontaktów elektrycznych elektrody drutowej oraz wygładzania powierzchni elementów stębnówki.

W rozdziale dziewiątym przeprowadzono analizę elastycznego narzędzia ściernego, utworzonego z ziaren ściernych pod wpływem pola magnetycznego w szczelinie roboczej. Wyniki tej analizy wskazują, że obróbka takim elastycznym narzędziem ściernym jest uwarunkowana występowaniem ruchu roboczego obrabianego przedmiotu (ruch obrotowy, posuwisto-zwrotny lub ich kombinacje) lub obwodu generującego strumień magnetyczny. Istotnymi parametrami procesu obróbki magnetyczno-ścierniej jest różnica prędkości pomiędzy obrabianym przedmiotem a powierzchnią nabiegunnika generującego strumień magnetyczny oraz koncentracja ziaren ściernych.

W rozdziale dziesiątym przedstawiono wyniki badań dotyczące porównania wartości indukcji magnetycznej na powierzchni separatora dla układu z dwóch magnesów ułożonych w stosie z układem dwóch magnesów zasilanych cewką indukcyjną. Wykazano, że zastosowanie cewki indukcyjnej umożliwia zmianę wartości indukcji magnetycznej w zakresie w $\pm 6\%$.

W rozdziale jedenastym zamieszczono podsumowanie oraz sformułowano 11 wniosków końcowych. W podsumowaniu nie doszukano się jednoznacznego potwierdzenia osiągnięcia sformułowanych w rozdziale 3 celów naukowych rozprawy oraz wykazania słuszności postawionej tezy. Dyskusyjnym jest przywołanie w podsumowaniu celu pracy, który nie w pełni pokrywa się z celami szczegółowymi wymienionymi w rozdziale 3.

Sformułowane wnioski końcowe mają różny stopień ważności i szczegółowości, lecz potwierdzają osiągnięcie przez Doktoranta zamierzonych celów naukowych rozprawy. Niedosyt budzi brak ich uszeregowania i podziału na wnioski poznawcze i utylitarne.

Literatura obejmuje 118 pozycji bibliograficznych pochodzących z książek, artykułów w czasopismach krajowych i zagranicznych, referatów zamieszczonych w materiałach konferencji zagranicznych i krajowych oraz 9 pozycji uzupełniających (strony internetowe). W wykazie literatury zamieszczono 5 współautorskich publikacji opublikowanych w czasopiśmie *Mechanik*. Poszczególne pozycje bibliograficzne są na ogół poprawnie dobrane lecz nie wszystkie z nich są cytowane w tekście rozprawy (np. poz.: 18, 33÷36, 63, 83, 97÷98).

Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska wnosi wartości poznawcze i aplikacyjne w zakresie rozwoju obróbki magnetyczno-ścierniej. Zawarte w recenzji uwagi krytyczne mają na ogół charakter dyskusyjny, do których Doktorant może odnieść się podczas publicznej obrony. Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam:

- modelowanie i symulacje numeryczne rozkładu pola magnetycznego i indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej,
- symulacje numeryczne modelu stanowiska badawczego oraz weryfikację modelu numerycznego z rzeczywistymi charakterystykami na stanowisku badawczym,
- zaprojektowanie stanowisk badawczych do realizacji procesu wygładzania magnetyczno-ściernego przedmiotów o powierzchniach płaskich i kształtowych, wewnętrznych i zewnętrznych,
- opracowanie zbioru równań regresji, opisujących zależności wpływu wybranych parametrów procesu wygładzania magnetyczno-ściernego na chropowatość powierzchni,
- sformułowanie wniosków i wytycznych dla doskonalenia obróbki magnetyczno-ścierniej.

3. Ocena strony redakcyjnej

Oceniając rozprawę doktorską pod względem redakcyjnym stwierdzam, że tytuł rozprawy odzwierciedla jej treść, układ pracy oraz jej podział na rozdziały i podrozdziały jest poprawny. Rozprawa napisana jest na ogół poprawnie pod względem językowym, jednak Doktorant nie ustrzegł się błędów gramatycznych, interpunkcyjnych, niefortunnnych sformułowań i określeń oraz innych uchybień. Poniżej przytoczono przykłady takich błędów:

str. 14⁵ - "*Niska odporność magnetyczna przedmiotu poruszającego się ...*";

str. 33÷34 - w podpisie rys. 22 pominięto opisy schematów oznaczonych: a), b), c), d);

str. 35÷36 - w podpisie rys. 23 brak opisu schematów oznaczonych: A), B), C), D, E, F);

str. 123₄ - "*Natomiast jej zmiana w wyniku obróbki jest mała*";

str. 123₄ - "*Po obróbce magnetyczno-ścierniej ilość miedzi nieznacznie spada ...*";

str. 126₃ - "*Dla próbek obrobionych powierzchnie uległy zmianie*".;

- str. 123₄ - *"Natomiast jej zmiana w wyniku obróbki jest mała";*
- str. 123₄ - *"Po obróbce magnetyczno-ścierniej ilość miedzi nieznacznie spada ...";*
- str. 126₃ - *"Dla próbek obrobionych powierzchnie uległy zmianie".;*
- str. 127² - *"Pierwsza obrobiona powierzchnia (średnia wartość 400HV), druga obrobiona powierzchnia metodą EDM a następnie magnetyczno-ściernie ...";*
- str. 127₂ - *"Natomiast pomiar został zaburzony przez ...";*
- str. 131¹⁰ - zdania bez podmiotu, np.: *"Posiada doskonałą odporność na korozję ..."* i str. 131¹² *"Posiada niski współczynnik sprężystości ..";*
- str. 149⁴ - *"Przekazywanie zasilania narzędzia poprzez ślizganie się drutu po kontakcie ...";*
- str. 156⁶ - *"Wielkość natężenia zewnętrznego pola magnetycznego ...";*
- częste stosowanie skrótów na początku zdania, np.; str. 111⁷ - *"Na rys. 102 ..."*; str. 111⁹ - *"W tab. 17, 18 ..."*, str. 151₅ - *"Na rys. 150 ..."*; str. 159¹ - *"Na rys. 157 przedstawiono ..."* oraz str. 159⁴ - *"Rys. 158 przedstawia ..."*;
 - stosowanie dużych liter po dwukropku, np.: str. 51⁵, str. 57⁷, str. 59¹², str. 121⁸.

Wymienione przykłady błędów mają głównie charakter edytorski i nie wpływają znacząco na pozytywną ocenę rozprawy.

4. Wniosek końcowy

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

Na podstawie przedstawionej oceny stwierdzam, że opiniowana praca mgr inż. Michała Marczała spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w art. 187 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. i może stanowić podstawę do ubiegania się o stopień naukowy doktora w dziedzinie Budowa i Eksploatacja Maszyn.

Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Michała Marczała do publicznej obrony przedstawionej rozprawy doktorskiej.



Łódź, dn. 18.12.2018r.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Gołąbczak