Wiesław Zwierzycki
prof. dr hab. inż.
Instytut Maszyn Roboczych
l Pojazdów samochodowych,
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
Politechniki Poznańskiej

Poznań, 31.05.2021 r.

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Lemechy
pt. „Wpływ właściwości napawanych warstw wierzchnich
na zużycie w glebowej masie ściernej”

1. **Podstawa wykonania recenzji**

Pismo zlecające opracowanie recenzji z Wydziału Nauk Technicznych Uniwersytetu Warmińsko - Mazurskiego w Olsztynie (WNT-Dz.DR-IM.12.2021 z dnia 19.04.2021) podpisane przez – Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny „Inżynieria Mechaniczna” prof. dr hab. inż. Marka Markowskiego, na podstawie Uchwały Rady Naukowej Dyscypliny z dnia 8 kwietnia 2021 o powołaniu recenzentów.

2. **Dane ogólne**

Promotorem recenzowanej rozprawy jest prof. dr hab. inż. Jerzy Napiórkowski, zaś promotorem pomocniczym dr inż. Krzysztof Ligier.

Badania przeprowadzone w ramach realizacji pracy były współfinansowane z grantu dla Młodych Naukowców nr 16.620.028-300 pod tytułem zgodnym z tytułem rozprawy(Wydział Nauk Technicznych UW-M w Olsztynie).

Praca liczy ogółem 173 strony druku A4 i składa się z siedmiu rozdziałów merytorycznych, wprowadzenia, spisu treści, spisu cytowanej literatury oraz streszczenia. Spis cytowanej literatury obejmuje łącznie 247 pozycji, z czego ok. 45% są to publikacje z ostatnich 10 lat. Prawie 60% łącznej sumy publikacji stanowią opracowania anglojęzyczne, ale wypada też recenzentowi zauważyć odniesienia do prac w języku rosyjskim, „klasyków” badań nad mechanizmami zużycia narzędzi rolniczych w glebie, takich jak Chruščov, Babičew, Tennenbaun i inni. Generalnie można uznać „rozpoznanie literaturowe” problemu za kompleksowe i szerokie, co uzasadnia nieco może rozbudowaną, w stosunku do innych elementów rozprawy doktorskiej, część wprowadzeniową.

3. **Charakterystyka i analiza rozprawy**

Elementy urabiające ziemię intensywnie się zużywają, co powoduje konieczność ich wymiany bądź okresowej ich regeneracji. Generuje to dodatkowe koszty materiałowe i robocizny a także przestoje w pracy.

Wśród nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych stosowanych na elementy robocze maszyn i narzędzi obrabiających glebę można wyróżnić stale odporne na zużycie ścierne (nazywane w skrócie stalami trudnościeralnymi), stale borowe oraz, nakładane na powierzchnie ulegające największemu zużyciu, napoiny

wielowarstwowe na bazie metali przejściowych i pierwiastków amfoterycznych oraz węgliki spiekane. O ile można w przybliżeniu uznać, że odporność stali na zużycie w glebie badano od dawna i sporo osiągnięto w zakresie metod poprawy tych stali na zużycie, to w tym drugim dziale „materiałowym" jest jeszcze wiele do zrobienia.

Jedną ze stosowanych technologii „miejscowego wzmacniania" jest napawanie elektrodami otulonymi na bazie Fe-C-Cr, zawierającymi dodatkowo pierwiastki węglikotwórcze tj. niob i wanad. Do badań dogłębnych, wyjaśniających mechanizmy zużycia zachęca fakt, że narzędzia z napoinami wielowarstwowymi wykazują znacząco większą trwałość podczas pracy w glebie, niż narzędzia ze stali „trudnościeralnych".

Właśnie w tym drugim, mniej zbadanym, obszarze badawczym mieści się temat Doktorantki „Wpływ właściwości napawanych warstw wierzchnich na zużycie w glebowej masie ściernej". Złożoność tego tematu wynika z technologii nakładania, ale przede wszystkim z dużej różnorodności składu chemicznego materiałów dodatkowych, przeznaczonych na napoiny odporne na zużycie w glebie. Do tej pory nie ma opracowań, które opisywały matematycznie wpływ na właściwości tribologiczne warstwy wierzchniej kontaktowanej z glebą, struktury napoin czyli głównie rozłożenia i cech geometrycznych wydzieleń. Zagadnienie to podjęła w swoich badaniach doktorskich mgr inż. Magdalena Lemecha. Wybrała zatem temat bardzo ważny ze względów poznawczych, którego rozwiązanie, przynajmniej częściowe, przyczyni się również do istotnych korzyści praktycznych (ekonomicznych).

Na początku rozprawy, po stosunkowo krótkim wprowadzeniu pełniącym role wstępu, przedstawiony został rozdział pierwszy zatytułowany „Aktualny stan zagadnienia", liczący około pięćdziesięciu stron. W kolejnych podrozdziałach Autorka przedstawiła najpierw ogólną klasyfikację i charakterystykę procesów zużyciowych zachodzących w maszynach i pojazdach, by w podrozdziale drugim skupić się na zużywaniu narzędzi w glebowej masie ściernej. Kolejne „kwanty" wiedzy dotyczą materiałów odpornych na zużycie w glebowej masie ściernej (stali, materiałów spiekanych i napawanych warstw wielofazowych) oraz zagadnień prognozowania i identyfikacji procesów zużycia w glebie.

Jak na potrzeby samej dysertacji doktorskiej ten rozdział, przygotowujący sformułowanie w rozdziale drugim problemu naukowego, celu i zakresu pracy jest zbyt obszerny. Ma on „mieszany" charakter : podręcznikowo-analityczny. Jednak biorąc pod uwagę fakt, ze opracowany w doktoracie materiał nadaje się do wydania drukiem w formie monografii naukowej, takie rozwiązanie oceniam pozytywnie. Uznaję, ze Autorka dała w nim wyraz swojej dużej wiedzy o procesach zużycia w ogólności i o zjawiskach w glebowej masie ściernej w szczególności, popierając to obszerną bibliografią, o czym już wcześniej pisałem.

Z przeprowadzonego rozpoznania literaturowego wynika, że mimo licznych badań dotyczących tzw. zużycia ściernego, nadal nie jest wyjaśniony problem kształtowania się cech geometrycznych węglików na powierzchni warstw wierzchnich tworzonych metodami napawania wielowarstwowego, na powierzchniach narzędzi ulegających największemu zużyciu w glebowej warstwie ściernej. Ten problem naukowy Autorka sformułowała na stronie siedemdziesiątej w formie pytania: „Czy istnieje istotna zależność wpływu rodzaju, kształtu i udziału wydzieleń węglikowych w

warstwie wierzchniej napoiny na właściwości tribologiczne w warunkach oddziaływania glebowej masy ściernej".

Jako cel pracy przyjęto : „analizę kształtu i udziału wydzieleń węglikowych na powierzchni napawanych warstw wierzchnich i ocenę ich wpływu na właściwości tribologiczne w glebowej masie ściernej".

Osiągnięcie przyjętego celu (po analizie stan wiedzy dokonanej w rozdziale pierwszym rozprawy) wymagało realizacji następujących zadań:

- wybór materiału do badań uwzględniający rodzaj węglików uzyskiwanych po napawaniu,
- analiza składu chemicznego badanych materiałów oraz identyfikacja wydzieleń poszczególnych pierwiastków węglikotwórczych,
- opracowanie warunków eksperymentu tribologicznego i badanie właściwości tribologicznych warstw wielofazowych w warunkach glebowych,
- wykonanie i analiza zdjęć mikroskopowych próbek badanych materiałów(opracowanie algorytmu wyznaczania cech geometrycznych wydzieleń pierwiastków węglikotwórczych) w celu identyfikacji cech geometrycznych wydzieleń węglikowych,
- ocena wpływu glebowej masy ściernej oraz właściwości warstw napawanych na proces zużywania,
- identyfikacja parametrów wpływających na zużycie badanych materiałów w glebowej masie ściernej,
- ocena właściwości struktury na podstawie zdjęć mikroskopowych powierzchni próbek badanych materiałów,
- opracowanie modelu zużycia warstw napawanych w warunkach glebowych.

Do badań wytypowano (rozdział trzeci) osiem rodzajów napoin na bazie Fe-C-Cr zawierających zróżnicowane dodatki pierwiastków węglikotwórczych, nałożonych na podkładkę ze stali Hardox500. Stal ta charakteryzuje się wysoką odpornością na zużycie ścierne, bardzo dobrymi własnościami mechanicznymi i wytrzymałością na obciążenia udarowe, możliwością obróbki skrawaniem a także spawalnością. Stal stosowana jest na elementy robocze podlegające zużywaniu ściernemu w maszynach i urządzeniach górniczych i rolniczych.

Podstawą składu chemicznego napoin jest stop Fe-Cr-C oraz w zależności od gatunku dodatkowe pierwiastki tj. mangan, molibden, wolfram, wanad oraz niob. Oznaczenia elektrod napoin wg producenta to: El-Hard 61 lub 63, 65, 6710 XHD, 6715 XHD oraz 6060N i 6070N. W tabeli 11 podano zawartość procentową poszczególnych pierwiastków (C, Mn, Si, Cr, Mo, W, V, Nb). Przed badaniami tribologicznymi, odpowiednio przygotowane próbki poszczególnych wersji materiałowych (podkładka plus napoina) poddano obserwacjom mikroskopowym z użyciem mikroskopu Neophot52 sprzężonego z kamerą cyfrową DLT-Cdm (mikroskopia świetlna) oraz Phenom X1 (mikroskopia SEM), co umożliwiło identyfikację mikrostruktury poszczególnych napoin (przed eksperymentem tribologicznym).

Kolejny rozdział czwarty rozprawy zawiera główne elementy metodyki badań, takie jak: charakterystyka warstwy wierzchniej napoin (głównie chodziło o pomiary mikrotwardości poszczególnych wydzieleń węglików występujących w badanych materiałach), analiza cech geometrycznych wydzieleń pierwiastków węglikotwórczych(z wykorzystaniem metody komputerowej analizy obrazu przy

pomocy programu Matlab Simulink 2020a – MathWorks, USA, wg algorytmu Autorki). Opisano również metodykę przeprowadzania eksperymentu tribologicznego (p. 4.3), obserwacje powierzchni badanych materiałów (p.4.4) oraz metody opracowania wyników (w p. 4.5).

Badania tribologiczne przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych na stanowisku „wirującej misy", służącym do oceny zużycia w masie glebowej. Urządzenie umożliwia automatyczną rejestrację wyników pomiarów np. siły tarcia. Wyposażono je również w system nawilżania i pomiaru wilgotności masy ściernej oraz w mechanizm dogniatania i spulchniania. Jako modelową masę ścierną zastosowano glinę lekką. Zużycie próbek określono wagowo.

W rozdziale piątym – przedstawiono wyniki badań oraz ich dyskusję. W kolejnych podrozdziałach omówiono:

- wyniki analizy składu chemicznego badanych materiałów metodą EDS; umożliwiło to identyfikację rodzaju węglików, które następnie poddano analizie obrazu celem określenia ich cech geometrycznych (p.5.1),
- wyniki pomiarów mikrotwardości (p.5.2) poszczególnych faz w badanych materiałach, zestawione w tabeli 17 dla osnowy oraz węglików (chromu, niobu i wanadu); najtwardszą osnową charakteryzowała się napoina 6715XHD, a najbardziej miękką EL-Hard65; w przypadku wydzieleń węglika chromu najwyższe wartości odnotowano dla napoiny 6715XHD, w drugiej kolejności dla 6060N;
- charakterystykę cech geometrycznych (p. 5.3) wydzieleń węglików występujących w badanych materiałach; wykorzystano wybrane współczynniki kształtu zamieszczone w pracy w tabelach 11-14; na podstawie uzyskanych w badaniach wartości poszczególnych współczynników dokonywano charakterystyki cech geometrycznych wydzieleń węglików chromu, niobu i wanadu występujących w badanych napoinach, co umożliwiło określenie ich kształtu; stwierdzono zróżnicowanie kształtu wydzieleń węglików tych samych faz występujących zarówno w tej samej napoinie, jak również pomiędzy badanymi materiałami; dalsza część podrozdziału poświęcono obszernej charakterystyce poszczególnych materiałów napoin;

  Podrozdział ten można podsumować następująco:

  - na podstawie „długości granicy obiektu" oraz „długości obwodu wypukłego obiektu" zauważono, że najbardziej zróżnicowane pod względem wielkości były węgliki chromu; różnice w wartościach wyznaczonych długości obwodów świadczyły o tym, ze wydzielenia chromu były rozgałęzione i nie posiadały zwartej budowy;
  - w przypadku wydzieleń węglika niobu różnice nie były tak znaczne, co oznaczało że posiadały one bardziej regularny kształt;
  - najmniejsze różnice pomiędzy wyznaczonymi długościami obwodów stwierdzono dla węglika wanadu;
  - największymi wydzieleniami cechowały się węgliki chromu, najmniejszymi zaś węgliki wanadu, ponadto najbardziej zróżnicowane wielkości wydzieleń węglików pomiędzy poszczególnymi materiałami występowały dla fazy chromu i niobu, najmniejsze zaś dla wanadu.

Zasadniczą część badań stanowił eksperyment tribologiczny, którego wyniki przedstawiono w podrozdziale 5.4. W pierwszej części dokonano wyznaczenia wartości współczynnika tarcia dla każdego z materiałów badawczych. Najmniejszą wartość współczynnika tarcia odnotowano dla napoiny El-Hard63, której materiał cechował się jedną z najwyższych zawartości procentowych chromu i nie posiadał wydzieleń innych węglików. Wydzielenia chromu charakteryzowały się zróżnicowanym kształtem. Zdaniem Autorki dysertacji ich powierzchnia w stosunku do powierzchni osnowy jest dużo mniejsza, co mogło powodować osłabienie osadzenia twardych węglików. Można wiec przypuszczać, że kontakt materiału ściernego jest większy z miękką osnową, co wpłynęło na względnie niską wartość współczynnika tarcia.

Rozpiętość wartości wyznaczonych wartości współczynnika tarcia jest znaczna- najmniejsze wartości stwierdzono w przypadku napoin EL-Hard63 (μ~ 0,42) oraz EL-Hard67 (μ~0,46), największą zaś dla napoiny 6060 (μ~0,86).

Drugi etap badań tribologicznych polegał na wyznaczeniu intensywności zużywania się wytypowanych materiałów napoin w modelowej masie ściernej. W formie zbiorczej wyniki tego etapu badań przedstawiono na rys. 112 (wcześniej również na rys. 101).

Recenzent przy analizie pominął wyniki badań napoiny 6715XHD, ze względu na odbiegającą od pozostałych przypadków charakterystykę.

Najmniejszą intensywność zużywania (~0, 0045) stwierdzono dla napoiny 6070N, nieco większą (~0,0052) dla napoiny 6060N. Po przeprowadzonym eksperymencie tribologicznym analizie poddano powierzchnie badanych materiałów celem identyfikacji mechanizmów (śladów)zużywania. Wykorzystano do obserwacji obrazy mikroskopowe powierzchni próbek wykonane po 20 000 m drogi tarcia. Zidentyfikowano na powierzchniach, przede wszystkim proste, mechaniczne sposoby zużywania, takie jak: mikroskrawanie, bruzdowanie, rysowanie, zmęczenie powierzchniowe. Ich ukierunkowanie oraz intensywność uzależnione są od ukształtowania mikrostruktury napoiny.

Na powierzchni napoiny 6060N ślady bruzdowania widoczne są w osnowie materiału, natomiast twarde węgliki chromu, które ułożone są wzdłuż bruzdy, nie ulegają niszczącemu oddziaływaniu tego sposobu zużycia. Wydzielenia chromu mające kształt podłużny, ułożone były w kierunku przeciwnym do przebiegu bruzdy, powodując jej zatrzymanie a po ominięciu wydzielenia dalsza bruzda widoczna była w osnowie materiału. Ponadto na powierzchni materiału widoczne są wyrwania węglików chromu, co z pewnością wpłynęło na utratę masy tego materiału.

Z kolei w przypadku napoiny 6070N, dla której odnotowano najniższe zużycie, nie ma widocznych kraterów po usuniętych wydzieleniach węglików, a jedynie zaobserwowano ich wykruszenie. Bruzda powstała w wyniku oddziaływania środowiska ściernego widoczna była również w osnowie materiału wzdłuż wydzieleń węglika chromu. Zauważono również niewielkie ślady rysowania. Pomimo występujących śladów zużycia, materiał ten okazał się najbardziej odporny na zużycie w glebowej warstwie ściernej.

Powierzchnia materiału dla którego z kolei odnotowano największe zużycie masowe (EL-Hard 61), charakteryzowała się przede wszystkim bruzdowaniem, a także licznie występowały kratery po usuniętych w procesie tarcia węglikach. Bruzdowanie przebiegało w kierunku przeciwnym do ułożenia wydzieleni chromu. Głębokość

bruzdy była znacznie większa, niż w innych badanych materiałach, na co wpłynęła prawdopodobnie mikrotwardość osnowy, która była najniższa. W wyniku procesu bruzdowania węgliki chromu wykruszyły się, a także były częściowo wyrywane. Widoczne również były kratery po ubytkach wydzieleń węglika niobu.

W rozdziale szóstym zaproponowano model „wiążący" cechy geometryczne wydzieleń węglików ze zużyciem napoin w masie glebowej. Siłą rzeczy można było wykorzystać jedynie współczynniki kształtu wyznaczone dla wydzieleń węglika chromu, ponieważ występował on w każdej napoinie. W pracy analizowano 27 współczynników kształtu opisujących geometrie wydzieleń węglików w badanych materiałach, lecz w końcowym etapie w modelu regresyjnym użyte zostały: powierzchnia, orientacja, wymiar pudełkowy, współczynnik eliptyczności, maksymalna średnica Fereta oraz współczynnik pofałdowań. Udział wariancji wyjaśniającej dla wymienionych tu sześciu parametrów wyniósł 99,71%.

Analizę siły wpływu każdego z wytypowanych i ujętych w modelu regresyjnym współczynników kształtu wydzieleń węglików chromu na zużycie badanych napoin powiązano z obrazami ich powierzchni po badaniach zużyciowych. Największą siłą wpływu decydującą o zmniejszeniu intensywności zużycia charakteryzował się współczynnik określający powierzchnię węglika chromu. Dla materiałów, w których większość powierzchni mającej kontakt ze ścierniwem zajmowały twarde wydzielenia węglików, zużycie było niższe niż w przypadku oddziaływania bezpośrednio na miękką osnowę. Natomiast o zwiększeniu intensywności zużycia decydują smukłe i podłużne wydzielenia charakteryzujące się maksymalną średnicą Fereta, będącą miarą rozciągłości cząstki. Zużycie materiałów posiadających wydzielenia chromu o wydłużonym kształcie jest większe. Ulegały one uszkodzeniu, poprzez wykruszanie ich fragmentów w wyniku oddziaływania materiału ściernego. Zjawisko to nie było tak zauważalne w przypadku wydzieleń mniejszych, o bardziej regularnym kształcie. Pozostałe współczynniki kształtu wydzieleń węglików, występujące w modelu regresyjnym, wykazały mniejszy wpływ na zużycie badanych napoin.

Recenzenta zainteresował jeszcze inny aspekt wyników eksperymentu tribologicznego i w tym celu zestawił na podstawie danych z pracy „ranking" wartości współczynnika tarcia i intensywności zużycia dla poszczególnych materiałów. Materiał 6715XHD został w zestawieniu pominięty, ze względu na odmienny, niż w przypadku pozostałych materiałów, „przebieg" zużycia w funkcji drogi tarcia.

Lp.	Wsp. tarcia [-]		Intensywność zużywania	
	Napoina	Wartość μ	Napoina	Wartość „I"
1.	EL-Hard63	0,42	6070N	0,0045
2.	EL-Hard67	0,46	6060N	0,0052
3.	EL-Hard61	0,66	EL-Hard67	0,0052
4.	6070N	0,70	EL-Hard65	0,0053
5.	EL-Hard65	0,71	6710XHD	0,0054
6.	6710XHD	0,72	EL-Hard63	0,0060
7.	6060N	0,86	EL-Hard61	0,0076

Proszę Autorkę rozprawy o skomentowanie dwóch problemów:

1) Jak wyjaśnić „swoisty” paradoks, że materiał 6060N który wykazał w glebie najwyższy współczynnik tarcia ~0,86, jednocześnie w próbie zużyciowej znalazł się na „dobrej” drugiej pozycji za względnie niską intensywnością zużywania?
2) Czy przy doborze materiału na narzędzia obrabiające glebę istotne jest kryterium „oporów tarcia”, czy decyduje głównie odporność na zużywanie?

4. Ocena pracy

Praca doktorska mgr inż. Magdaleny Lemechy to oryginalne osiągnięcie w obszarze nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie- inżynieria mechaniczna. Podjęty w niej temat jest bardzo ważny z poznawczego i praktycznego punktu widzenia . Uzyskane wyniki badań i analiz stanowią oryginalny wkład do wiedzy w dyscyplinie „Inżynieria Mechaniczna”. Praca ma charakter interdyscyplinarny i wymagała od Autorki dodatkowego zgłębienia wiedzy o współczesnych materiałach (do zastosowań w trudnych warunkach użytkowania) oraz o metodach badań ich mikrostruktury.

Wybór tematu oceniam jako bardzo trafny . Pragnę też podkreślić, że prawdopodobnie jest to efekt kompleksowego planowania badań przez promotora i lidera zespołu prof. dr hab. inż. Jerzego Napiórkowskiego, który od wielu lat prowadzi badania mad poznaniem mechanizmów zużywania narzędzi urabiających glebę oraz materiałów zwiększenia ich trwałości.

Tym niemniej stwierdzam, że temat p. mgr inż. Magdaleny Lemechy jest indywidualny i zrealizowany samodzielnie.

Jako oryginalne osiągniecie naukowe tej pracy doktorskiej uznać można:

- opracowanie modelu matematycznego ujmujące wpływ na zużycie napoin (na bazie stopu Fe-C-Ce) na najbardziej narażone na zużycie powierzchnie narzędzi pracujących w glebie, geometrycznych parametrów wydzieleń węglików, na wymiar (lub intensywność) zużycia tychże napoin.

Realizacja takiego zadania wymagała opanowania technik instrumentalnych z różnych dziedzin, między innymi komputerowych metod analiz obrazu, co w osiągnieciu głównego celu pracy odegrało rolę zasadniczą. Pomysłowo został też zaprojektowany i zrealizowany eksperyment tribologiczny. Zrealizowana praca w naturalny sposób generuje kierunki dalszych badań.

Pragnę zatem stwierdzić, ze Doktorantka jest przygotowana do samodzielnego planowania i prowadzenia badań naukowych podstawowych, ale wyraźnie ukierunkowanych na zastosowanie praktyczne.

Praca jest napisana poprawnym językiem, posiada dobry materiał ilustracyjny. Szczególnie dotyczy to bardzo dobrej jakości zdjęć mikroskopowych, pozwalających prawidłowo interpretować złożone efekty w mikrostrukturach napoin pełniących rolę warstw przeciwzużyciowych.

Biorąc pod uwagę oryginalność wyników badań sugeruję wydanie pracy doktorskiej mgr in. Magdaleny Lemechy w formie książkowej (po niewielkich korektach)

Z tegoż samego powodu tj. oryginalności wyników badań i ich znaczenia dla rozwoju nauki i techniki proponuje wyróżnienie pracy.

5. Wniosek końcowy

Na podstawie dokonanej analizy i oceny pracy mgr inż. Magdaleny Lemechy pt. „Wpływ właściwości napawanych warstw wierzchnich na zużycie w glebowej masie ściernej” stwierdzam że spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim w ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U. z 2020 r.)z późniejszymi zmianami).

Z poważaniem

prof. dr hab. inż. Wiesław Zwierzycki