

dr hab. inż. Andrzej Dzierwa, prof. uczelni
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
ul. Powstańców Warszawy 8
35-959 Rzeszów
tel. +48 17 7432546
e-mail: adzierwa@prz.edu.pl

Rzeszów, 07.11.2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Grzegorza Wszelaczyńskiego

pt. Wpływ nanocząstek węgla na właściwości tribologiczne kompozycji smarowych

Podstawą recenzji jest pismo o numerze W10/D/91/2023 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego z dnia 05 października 2023 roku.

1. Uzasadnienie podjętego problemu

Poprawa właściwości przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych węzłów kinematycznych stanowi istotne zagadnienie w dziedzinie budowy i eksploatacji maszyn w zakresie tribologii. Przeciwdziałanie tym zjawiskom prowadzone być może m.in. na drodze doboru materiałów konstrukcyjnych, obróbki powierzchniowej a także na drodze doboru składu środka smarowego. Metodą, najskuteczniej redukującą negatywne skutki tarcia oraz oporów ruchu, jest taki dobór cech geometrycznych i materiałowych dla projektowanych węzłów ślizgowych, aby pracowały one przy tarcia płynnym. Jednak nie zawsze można doprowadzić do wystąpienia tego rodzaju tarcia, a często jest to wręcz niemożliwe. Dlatego też istotną rolę odgrywa odpowiedni dobór i kompozycja środka smarowego. Smary plastyczne stanowią obok olejów najliczniejszą grupę środków smarnych stosowanych w bardzo wielu dziedzinach przemysłu. Stosunkowo prostym i efektywnym sposobem poprawy ich właściwości jest wprowadzenie w skład smarów plastycznych tzw. napełniaczy – substancji różnej natury i stężenia, nierozpuszczalnych w plastycznej osnowie i niezaburzających struktury koloidalnej smaru. Ma to szczególne znaczenie w przypadku węzłów działających w ekstremalnych warunkach, tj. przy dużych naciskach i małych prędkościach poślizgu. Napełniacz może również polepszać właściwości ślizgowe kompozycji smarnej, powodując zmniejszenie strat tarcia.

Rozprawa pt. „*Wpływ nanocząstek węgla na właściwości tribologiczne kompozycji smarowych*” dotyczy wpływu zawartości nanocząsteczek węgla na właściwości tribologiczne kompozycji smarowych stalowych skojarzeń ślizgowych. W celu poprawnego określenia oddziaływania tych dodatków na zmniejszenie wartości współczynnika tarcia oraz zużycia współpracujących elementów węzłów tarciovych, powiązано ich wpływ z parametrami wymuszeń najczęściej analizowanymi w przemyśle, czyli z prędkością poślizgu i obciążeniem. W tym celu Autor wykonał odpowiednie kompozycje smarowe charakteryzujące się różną zawartością dodatku grafenu oraz zrealizował badania eksperymentalne. Uzyskane wyniki pozwoliły na sformułowanie wniosków a także przyczyniły się do wyznaczenia kierunków dalszych badań.

Można zatem stwierdzić, że przedstawiona praca doktorska Pana mgr inż. Grzegorza Wszelaczyńskiego wpisuje się swoją tematyką i zrealizowanym zakresem prac w aktualne obszary badań nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn.

2. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji praca liczy 101 stron i obejmuje stronę tytułową (1 strona), spis treści (1 strona), osiem rozdziałów podzielonych na zwarte tematycznie podrozdziały (91 stron) oraz bibliografię (8 stron). Spis literatury zawiera 111 pozycji w tym 6 stron internetowych. Pięć prac opublikowanych jest w roku 2023 a łącznie z nimi prac z ostatnich pięciu lat zacytowanych jest 8. Niestety w tym zestawieniu nie zauważyłem żadnej pozycji autorstwa lub współautorstwa Doktoranta. Nasuwa się więc pytanie, dlaczego Doktorant nie skorzystał z własnych publikacji? Kolejność rozdziałów i podrozdziałów oraz podział treści tworzą logiczny i spójny układ pracy. Praca oprócz tekstu zawiera 62 rysunki i 7 tabel.

Rozprawę rozpoczyna „*Wprowadzenie*”, w którym Autor przedstawia podstawowe informacje dotyczące procesu tarcia oraz jego negatywnych skutków powodujących znaczne straty energetyczne niezbędne do pokonania jego oporów. Rozdział zawiera również syntetyczny zbiór informacji na temat stosowanych sposobów zmniejszania oporów tarcia. Końcowe fragmenty „*Wprowadzenia*” poświęcone są omówieniu zagadnień, które będą w dalszej części przedmiotem rozprawy doktorskiej.

Rozdział 2 zatytułowany jest „*Przegląd literatury – analiza stanu wiedzy*”. W rozdziale tym, na 31 stronach, na podstawie analizy przedmiotowej literatury, Autor usystematyzował informacje dotyczące rodzajów stosowanych dodatków do smarów plastycznych oraz omawia ich rolę w polepszaniu charakterystyk tribologicznych smarów. Obszerną część rozdziału poświęcono roli grafenu i nano dodatkom węgla do smarów plastycznych jako, że węglowe dodatki smarnościowe zapewniają wysoką odporność termiczną oraz dobre właściwości przeciwcierne. Omówiono m.in. wpływ zawartości grafenu w smarze plastycznym na wielkość zużycia par ciernych a także możliwości stosowania innych odmian węgla (np. fulereny, nanorurki) jako napelnaczy smaru plastycznego.

Doktorant porusza również zagadnienia wpływu wybranych parametrów eksploatacyjnych na charakterystyki tribologiczne par tarcych, koncentrując się przede wszystkim na obciążeniu i prędkości poślizgu. Przegląd literatury kończy się Podsumowaniem, w którym Autor uzasadnia wybór tematyki rozprawy.

W rozdziale trzecim Autor prezentuje tezę pracy, która brzmi: *„na podstawie udziału procentowego grafenu Z% można, w powiązaniu z parametrami wymuszeń tj. prędkością poślizgu/obrotową v i obciążeniem F , prognozować poprawnie charakter i stopień zużycia stalowych skojarzeń ślizgowych”*. Teza została sformułowana poprawnie, jest zrozumiała i zwięzła. Tak postawioną tezę Doktorant uzasadnia brakiem w dostępnej literaturze tribologicznej opracowań dotyczących modelu wpływu udziału procentowego grafenu na charakterystyki tribologiczne smarów plastycznych lub kompozycji smarowych stosowanych w węzłach tarcych uwzględniających równocześnie zmienność parametrów wymuszeń. Stosownie do zaprezentowanej tezy pracy Autor określił niezbędne do jej udowodnienia cele szczegółowe.

Rozdział 4 to *„Program i metody badań”*. Doktorant prezentuje w nim przyjęty program badań, przyjmuje jako olej bazowy olej hydrauliczny VG32, określa procentowy udział dodatku grafenu w smarze (bez dodatku oraz z zawartością 0,03%; 0,08%; 0,13%; 0,16% grafenu) oraz przedstawia jakie badania i w jakiej kolejności będą realizowane. Następnie omawia przyjęte metody i warunki badań. Badania prowadzone na aparacie czterokulowym z zastosowaniem wytycznych normy PN-76/C-04147 „Badania własności smarnych olejów i smarów” pozwoliły na wyznaczenie trzech wskaźników: obciążenia zespawania F_z , granicznego obciążenia zużycia G_{oz} oraz wskaźnika zużycia I_h . Dodatkowo, dla porównania efektywności smarów z różną zawartością grafenu, posłużono się dodatkowym wskaźnikiem – obciążeniem granicznym F_g , które jest największym obciążeniem, przy którym nie zachodzi jeszcze zespawanie kulek. Do planowania tribologicznych badań eksperymentalnych na aparacie czterokulowym wykorzystano plan rotabilny przyjmując następujące przedziały wartości dla poszczególnych zmiennych:

- obciążenie, F – od 300 do 900 N,
- prędkość obrotowa, v – od 1000 do 2000 obr/min,
- udział procentowy grafenu, $Z\%$ – od 0 do 0,16 %.

O ile argumentacja dotycząca zakresu zmienności badanych parametrów wejściowych nie budzi wątpliwości o tyle brak jest argumentacji wyboru tych a nie innych parametrów do badań. Z pewnością są to parametry mogące istotnie wpływać na właściwości tribologiczne ale jak sam Autor zaznacza w dysertacji – takich parametrów jest dużo. Być może warto byłoby ocenić istotność wpływu większej grupy parametrów stosując np. badania przesiewowe, z drugiej strony wiązałoby się to ze znacznym zwiększeniem liczby badań.

Rozdział „*Program i metody badań*” zawiera również wykaz materiałów użytych do badań wraz z ich krótką charakterystyką. Obszerną część rozdziału poświęcono sposobowi przygotowania smaru plastycznego (zwanego dalej kompozycją smarową) z dodatkiem grafenu płatkowego do badań tribologicznych. Do obrazowania próbek wytworzonych kompozycji smarów plastycznych wykorzystano mikroskop skaningowy Phenom Pro-X znajdujący się na Politechnice Wrocławskiej. Ponadto celem określenia wpływu dodatku grafenu na strukturę smaru przeprowadzono badania reologiczne kompozycji smarowych z wykorzystaniem reometru rotacyjnego Physica AntonPaar MCR 101.

Rozdział 5 zatytułowany „*Badania tribologiczne przy styku skoncentrowanym punktowym*” w obszerny sposób prezentuje wyniki badań tribologicznych oraz ich analizę. Przeprowadzone na aparacie czterokulowym badania wykazały, że wprowadzenie dodatku smaru stałego, którym był grafen płatkowy, wpłynęło pozytywnie na charakterystykę zużycia niezależnie od jego procentowego udziału. W przypadku każdego ze smarów z dodatkiem grafenu wzrosło obciążenie zespawania F_z oraz obciążenie graniczne F_g , wobec czego Autor stwierdza, że smary z dodatkiem grafenu mogą być zastosowane przy wyższych obciążeniach roboczych. Niewątpliwie pozytywnym aspektem wpływu dodatku grafenu jest to, że dodatek grafenu w każdej ilości spowodował zwiększenie obciążenia zacierającego. Analizując średnice skaz kulek przy tych samych obciążeniach nie uzyskano tak jednoznacznego pozytywnego wpływu dodatku grafenu w smarze na wielkość zużycia. Różnice w średnicach skaz były mniejsze niż 5% w przypadku obciążeń powyżej 1000 N. Natomiast przy obciążeniach mniejszych niż 1000 N uzyskano wyniki niejednoznaczne. Np. w przypadku najmniejszego obciążenia (630 N) smary o największej zawartości grafenu (P130 i P170) charakteryzowały się największymi średnicami skaz. Szkoda, że Doktorant nie zaprezentował zdjęć mikroskopowych z pomiaru wybranych średnic skaz kulek. Z kolei Doktorant słusznie zauważa, że zagadnienie to wymaga dodatkowych badań chemicznych związanych z analizą składu chemicznego smaru przed i po procesie zmydlania, podczas którego zauważono duże parowanie i zmianę koloru smaru.

Kolejne zaprezentowane wyniki badań przeprowadzonych na aparacie czterokulowym dotyczyły wpływu udziału procentowego grafenu na charakterystykę zużycia przy zmiennych wartościach wymuszeń, tj. prędkości poślizgu v i obciążenia F . Badania przeprowadzone z wykorzystaniem planu rotalnego na pięciu poziomach zmienności umożliwiły uzyskanie równania regresji przedstawiające zużycie kulek d w funkcji obciążenia F , prędkości poślizgu v i udziału procentowego grafenu $Z\%$. Otrzymany model dobrze opisuje badane parametry. Wartość współczynnika korelacji R pomiędzy wynikami otrzymanymi z równania regresji a tymi z badań eksperymentalnych wyniosła 0,996, co świadczy o silnej zależności pomiędzy wartościami zużycia zmierzonymi i obliczonymi. Ponadto Doktorant, w celu ułatwienia interpretacji wpływu dodatku grafenu na charakterystyki tribologiczne, zaprezentował dziewięć wykresów dla wybranych wartości wymuszeń z przyjętego przedziału zmiennych wejściowych. Analizując otrzymane wyniki Doktorant zauważa, że przy stałych wartościach

obciążenia można określić ilość udziału procentowego grafenu przy którym niezależnie od zmiany prędkości wielkość zużycia będzie podobna – co w konsekwencji może pozwolić określić rewers wymiany środka smarnego. Doktorant stwierdza również, że wzrost udziału procentowego grafenu w smarze nie zawsze powoduje polepszenie odporności na zużycie oraz że istnieje prędkość poślizgu lub obciążenie graniczne powodujące zmianę charakteru udziału procentowego grafenu w postaci jego zwiększonej wielkości zużycia.

W rozdziale 6 Doktorant prezentuje wyniki badań reologicznych. Jak słusznie zauważa Autor, reologiczne badania dynamiczno-oscylacyjne są podstawowym narzędziem służącym do oceny stabilności mechanicznej siatki zagęszczacza smaru plastycznego. Badania te pozwalają ocenić dodatkowe opory przepływu smaru w układach smarowniczych oraz podczas rozruchu smarowanego węzła tarcia ponieważ opory te zależą od stopnia usieciowania mikrostruktury smaru oraz jej stabilności mechanicznej. Zgodnie z przyjętą metodą, Autor określa gęstość energii kohezji służącą do ilościowej oceny stopnia i siły flokulacji cząstek fazy zdyspergowanej w układzie heterogenicznym. Jest ona miarą sumy wszystkich oddziaływań fizykochemicznych między tymi cząstkami. Analizując wyniki badań energii kohezji Doktorant zauważa, że wraz ze wzrostem udziału masowego grafenu, smar staje się bardziej koherentny a energia kohezji zwiększa się wraz ze zwiększeniem udziału procentowego grafenu. Dodatek grafenu w ilości 0,03%; 0,08%, 0,13% i 0,16% spowodował wzrost energii kohezji odpowiednio o 6,8%; 33,1%; 34,5% i 114,7%. Z zaprezentowanych wyników widać również, że zwiększenie zawartości grafenu z 0,08% do 0,13% nie skutkowało istotnym zwiększeniem energii kohezji.

W rozdziale 7 „Wnioski końcowe” Autor syntetycznie podsumowuje wyniki swojej pracy, wskazując również na praktyczny aspekt przeprowadzonych badań. Z kolei w rozdziale 8 nakreśla kierunki dalszych badań.

Ostatni rozdział rozprawy to rozdział 9 „Literatura” w której Autor przedstawił 111 źródeł bibliograficznych w kolejności alfabetycznej wykorzystanych w Rozprawie.

3. Ocena pracy, uwagi ogólne i szczegółowe

Pod względem metodycznym pracę oceniam wysoko. Odpowiada przyjętym celom, zadaniom badawczym i jest dostosowana do obowiązujących wymogów. Doktorant wykazał się wiedzą i umiejętnością stosowania w szerokim zakresie różnych instrumentów i metod badawczych. W ramach realizacji pracy dobrano parametry środków smarnych i opisano sposób ich wytworzenia. Ponadto wykonano cztery nowatorskie środki smarne zawierające grafen, a różniące się jego zawartością wagową (0,03%; 0,08%; 0,13% i 0,16%) a także przeprowadzono szereg badań w których Doktorant wykorzystał metodykę planowania eksperymentu. Uzyskane wyniki potwierdziły słuszność postawionej tezy a nakreślone kierunki dalszych badań pozwalają mieć nadzieję na dalszą naukową działalność Autora. Praca napisana jest poprawnym językiem (choć zdarzają się błędy edytorsko-redakcyjne)

z wykorzystaniem właściwego nazewnictwa inżynierskiego. Podczas zapoznawania się z treścią Rozprawy nasunęły się następujące uwagi:

- Wykresy warstwiczne 51 b oraz 53 b są identyczne pomimo różnych towarzyszących nim wykresów przestrzennych (prawdopodobnie błąd wystąpił przy ich wklejaniu do pracy). Trudno zatem odnieść się do wartości zużycia podanych w tekście.
- Myślę, że nawet uproszczona analiza ekonomiczna / kosztowa aplikacyjności smarów z dodatkiem grafenu byłaby mile widziana, pewnie już w dalszych badaniach, które planuje Autor. Jaki byłby przybliżony koszt wykonania smarów z zaprezentowaną w pracy procentową zawartością grafenu? Wiadomo, że dodatek grafenu to jedna ze składowych wpływających na końcową cenę środka smarnego. Być może wyższy koszt początkowy zwróciłby się z nawiązką wskutek możliwości dłuższej eksploatacji skojarzenia trącego?
- W rozdziale 4 „*Program i metody badań*” Doktorant prezentuje m.in. tabelę 3 „wartości zmiennych wejściowych standaryzowanych i naturalnych na poszczególnych poziomach eksperymentu dla badań prowadzonych przy styku rozłożonym”. Niejasnym jest dlaczego, gdyż badań tribologicznych uwzględniających ten styk w pracy nie prowadzono, skupiając się na styku punktowym.
- Standardowo rozprawę doktorską winno się pisać w formie bezosobowej.
- W pracy występuje szereg symboli i skrótów. Warto byłoby zawrzeć w pracy wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów. Ponadto podstawową jednostką obciążenia jest N i to on winien być raczej używany w pracy zamiast daN. W dysertacji są one stosowane zamiennie.
- Część skanów w części teoretycznej jest nie najlepszej jakości i znaczna część z nich zawiera opisy w języku angielskim.
- Występują usterki natury edytorsko – redakcyjnej. Np. na stronie 8 powinno być grafen płatkowy a nie grafit płatkowy; na rysunkach 48-50 jako jednostka powinien być N a nie Nm; pojawiają się zarówno duże jak i małe cyfry we wzorach chemicznych (np. strona 20); we wzorze na intensywność zużywania (str. 27) podano współczynnik K – nie określono jednak od czego zależy ten współczynnik, jakie przyjmuje wartości itp.; z kolei na stronie 71 zawarto błędne odniesienie do p. 2.5 gdyż punkt ten nie zawiera informacji o których mowa w powołaniu się na niego.

Przedstawione powyżej uwagi mają jednak w większości charakter dyskusyjny i nie obniżają w żaden sposób wartości merytorycznej ocenianej Rozprawy.

4. Wniosek końcowy

Rozprawę doktorską Pana mgr inż. Grzegorza Wszelaczyńskiego oceniam jednoznacznie pozytywnie. Rozprawa stanowi niewątpliwą wkład do istniejącego stanu wiedzy w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn w zakresie tribologii. Zawarty w

Rozprawie materiał badawczy jest oryginalnym dorobkiem Doktoranta, który wykazał się znajomością literatury przedmiotu i umiejętnościami samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a uzyskane efekty mają istotne znaczenia poznawcze i użytkowe.

W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Grzegorza Wszelaczyńskiego pt. „*Wpływ nanocząstek węgla na właściwości tribologiczne kompozycji smarowych*” spełnia wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej.

Andrzej Dzierwe