

Sulejówek, 27.01.2021r

Dr hab. inż. Lech Starczewski

prof. Wojskowego Instytutu Techniki Pancernej i Samochodowej

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Roberta Czecha pt.:

„Wpływ wybranych warunków eksploatacji na skuteczność układu hamulcowego pojazdów samochodowych”

Recenzję opracowano na podstawie pisma Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Śląskiej Pani prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak, z dnia 25.11.2020 r. Praca doktorska została przygotowana pod kierunkiem prof. dr hab. Andrzeja Posmyka i promotora pomocniczego dr inż. Jana Filipeczyka.

1. Charakterystyka ogólna

Rozprawa przedstawiona jest na 144 stronach maszynopisu i podzielona na 10 rozdziałów; zawiera 24 tabele, 103 rysunki i 160 pozycji bibliograficznych krajowych i zagranicznych w tym 3 internetowe i jedną normę.

Napisana jest poprawnym językiem, edytorsko na dobrym poziomie.

2. Charakterystyka szczegółowa

2.1 Temat pracy

Istotnym obszarem działalności naukowej, leżącej u podstaw rozwoju nowoczesnych rozwiązań inżynierskich dla potrzeb techniki motoryzacyjnej i ogólnie pojmowanej techniki transportowej są konstrukcje wytworzone z materiałów o niewielkiej gęstości i odpowiedniej wytrzymałości. Do nich należą między innymi pary cierne systemów hamowania pojazdów mechanicznych. Podstawowymi kryteriami decydującymi o zastosowaniu określonych konfiguracji materiałowych w hamulcach jest ocena ich właściwości mechanicznych w tym podstawowej cechy jaką jest ich współzależność tribologiczna przejawiająca się właściwą i akceptowaną przez Regulamin nr 90 EKG ONZ - z punktu widzenia bezpieczeństwa drogowego - wartością współczynnika tarcia. Dodatkowo względy ekologiczne nakładają wymóg ograniczenia emisji do atmosfery szkodliwych chemicznie i wymiarowo pyłów pochodzących z procesu ścierania par ciernych podczas hamowania.

Szczególne warunki eksploatacji pojazdów samochodowych, ze względu na skrajnie zmienny zakres obciążeń eksploatacyjnych i zróżnicowane warunki środowiskowe, mają istotny wpływ na skuteczność hamowania definiowaną drogą hamowania. Doktorant zaobserwował ten fakt zarówno w odniesieniu do par ciernych wykonanych z tradycyjnych materiałów jak i z nowoczesnych kompozytów na bazie stopów metali lekkich.

Poczynione obserwacje stały się tematem recenzowanej pracy. Należy stwierdzić, że poruszana w pracy tematyka nie jest nowa, co widać z cytowanej literatury, jednak niewątpliwą atrakcyjnością

wpłynęło dnia 04. LUT 2021
nr 45 / 1006 zat. 1
2020/2021

pracy jest zbadanie wpływu na skuteczność hamowania tarcz hamulcowych wykonanych z materiałów (AlSi18NiMgCu oraz modyfikowanego żeliwa EN-GJL-250) narażonych na intensywne oddziaływanie środowiska w odniesieniu do identycznie narażonych tarcz z materiałów już stosowanych (kompozytu F3S.20S i żeliwa EN-GJL-250 w stanie niemodyfikowanym).

Podjęcie przez Doktoranta tematyki badań wybranych właściwości strukturalnych i mechanicznych materiałów pary cierniej hamulców tarczowych narażonych na agresywne oddziaływanie otoczenia oraz zbadanie ich wpływu na właściwości funkcjonalne poprzez opis prawdopodobnych zjawisk zachodzących w strefie tarcia uważam za trafne szczególnie w odniesieniu do materiałów kompozytowych.

Tematyka wpisuje się we współczesny nurt ukierunkowany na poszukiwanie nowych lekkich materiałów, o mniejszej emisyjności hałasu i szkodliwych pyłów, przy zachowaniu podstawowych cech funkcjonalnych hamulców pojazdów mechanicznych tj. dużej skuteczności hamowania i wzrostu niezawodności wynikających ze zmniejszenia wpływu na proces tarcia agresywnego środowiska. Ponadto opis zaobserwowanych zjawisk podczas przeprowadzonych badań laboratoryjnych i funkcjonalnych pogłębił wiedzę naukową z obszaru inżynierii mechanicznej z uwzględnieniem aspektów materiałowych.

Uwzględniając przedstawione argumenty uważam temat pracy za uzasadniony i użyteczny.

2.2 Tytuł, zakres i przedmiot pracy

Tytuł pracy odpowiada jej treści. Zakres pracy obejmował badania laboratoryjne i stanowiskowe cech funkcjonalnych wybranych konfiguracji materiałowych par ciernych hamulców samochodów narażonych na czynniki środowiskowe.

2.3 Analiza stanu wiedzy

Dobór literatury jest właściwy do tematyki pracy. Przeprowadzone studium literatury dostatecznie przybliży aktualny stan wiedzy i jest adekwatne do podejmowanych problemów badawczych.

Doktorant dokonał syntetycznego opisu budowy układów hamulcowych pojazdów samochodowych. Odnosił się do konfiguracji materiałowych tradycyjnych par ciernych stosowanych w hamulcach oraz do rozwiązań z zastosowaniem innowacyjnych tarcz hamulcowych bazujących na kompozytach ze stopów lekkich przy założeniu niezmienności materiału wkładek ciernych. W rozdziale 4 omówił właściwości mechaniczne, funkcjonalne i strukturalne tarcz hamulcowych wytworzonych z żeliwa, materiału powszechnie stosowanego oraz innowacyjnych materiałów kompozytowych na bazie stopów lekkich z osnową metalową lub ceramiczną. W ocenie właściwości funkcjonalnych skupił się przede wszystkim na ich przewodności cieplnej, odporności na korozję oraz wartości współczynnika tarcia. Ogólną wiedzę o ww. materiałach Doktorant kończy podsumowaniem wpływu materiałów kompozytowych na właściwości układu hamulcowego.

W tej części studium literatury Doktorant przytacza diagram dotyczący odporności na korozję materiałów tarcz hamulcowych str.35 rys.13 pozycja literatury [63] w podpisie, którego zawarta treść, a mianowicie cyt. „środowisko korozyjne: mgła solna, atmosfera obojętna” wymaga wyjaśnienia.

W ramach studium literatury, problemy tribologicznych warunków pracy hamulców zostały omówione w osobnym rozdziale (rozdział 5). Doktorant zwraca uwagę na najważniejsze czynniki określające tribologiczne warunki pracy do których zalicza m in.: stan powierzchni, postać i mikrostrukturę warstwy wierzchniej, charakter ruchu i wartość prędkości względnej, czas hamowania, temperaturę powierzchni tarcia, sposób zmiany obciążenia i wartość nacisków jednostkowych. Szczegółowy opis wpływu ww. czynników na parę cierną hamulca zawiera podrozdział 5.1. Na uwagę zasługuje zwrócenie uwagi przez Doktoranta na dwa podejścia opisujące mechanizm fizyko-

chemicznych procesów zachodzących w miejscu styku klocka hamulcowego z tarczą. To jest koncepcji tworzenia i degradacji w styku ciernym warstw lokalnych „plateau” złożonych z produktów trących się ciał oraz koncepcji tworzenia się pomiędzy okładziną a tarczą warstwy o składzie innym niż skład współpracujących ciał z jednoczesnym przeniesieniem powierzchni tarcia do tej warstwy. Osobny akapit zawiera opis wpływu temperatury na współczynnik tarcia przejawiający się zjawiskiem „fadingu”. Ostatnią częścią studium literatury są zagadnienia związane z wpływem korozji elementów ciernych na działanie układu hamulcowego. Syntetycznie przedstawiono metody zwiększania odporności na korozję i zmniejszenia zużycia tradycyjnych tarcz hamulcowych ze zwróceniem uwagi na metody modyfikacji żeliwa w procesie metalurgicznym, zastosowanie powłok ochronnych czy sposobów modyfikacji warstw wierzchnich.

W podsumowaniu studium stanu wiedzy Doktorant stwierdza, że są liczne prace [100-120], w których pośrednio wskazuje się, że proces korozji wynikający z oddziaływania środowiska atmosferycznego lub ujmując ogólnie – otoczenia, ma wpływ bezpośrednio na współczynnik tarcia pary cierniej a pośrednio na drogę hamowania a więc na bezpieczeństwo w ruchu pojazdów. Natomiast publikacje [121-129,132-135,141,148,153] oraz pośrednio [154-156] opisują wprost problemy korozji elementów tworzących parę ciernie hamulców i odnoszą się do materiałów tradycyjnych (żeliw) jak i nowoczesnych kompozytowych na bazie stopów lekkich.

Moim zdaniem, w studium literatury poświęcono zbyt wiele miejsca aspektom ekologicznym a mianowicie wpływu pyłu ściernego emitowanego z procesu tarcia par ciernych do otoczenia. W recenzowanej pracy nie znalazło to swojego odniesienia w zrealizowanych badaniach. Niepotrzebnie zaburzyło zasadniczy wątek pracy wprowadzając dualizm informacyjny, czego ma dotyczyć praca. W pracy doktorskiej nie jest istotna ilość literatury przedstawionej w spisie literatury, ale ważny jest jej dobór i adekwatność do określonego obszaru badawczego, z którego, po krytycznej analizie ma Doktorant wyłonić problem i postawić tezę lub cele pracy.

Przeprowadzona kwerenda literatury jest w zasadzie wystarczająca do opisu stanu wiedzy na temat wpływu korozyjnego środowiska na ogólnie ujmując proces tarcia w parze cierniej, aczkolwiek brakuje w podsumowaniu literatury własnego komentarza do przedmiotowego procesu i wskazania proponowanych sposobów zapobiegania lub ograniczenia jego skutków przejawiających się spadkiem skuteczności hamowania. Doktorant miał podstawy do takiego wniosku na podstawie przeprowadzonych obserwacji wyglądu układów hamulcowych narażonych na oddziaływanie otoczenia i zarejestrowanych dowodów z eksploatacji szerokiej gamy pojazdów samochodowych (rozdział 7 pracy).

Reasumując, zebrany materiał dowodowy z eksploatacji wsparty przeglądem literatury stał się genezą recenzowanej pracy doktorskiej.

2.4 Teza, cele i program prac

W recenzowanej pracy zawarto następującą tezę:

„Skuteczność i równomierność działania układu hamulcowego pojazdów samochodowych zależą w istotny sposób od warunków eksploatacji, w tym od czasu ekspozycji na atmosferyczne czynniki korozyjne. Zastosowanie aluminiowych materiałów kompozytowych na tarcze hamulcowe może przyczynić się do zmniejszenia zmian momentu hamującego indukowanych korozją oraz zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska produktami zużycia.”

Pierwsza część tezy pracy z pozoru wydaje się oczywistą, niewnoszącą nic nowego do wiedzy o wpływie warunków eksploatacji na skuteczności działania hamulca pojazdu samochodowego. Ponieważ pojęcie „warunki eksploatacji” jest obszerne, Doktorant zawęży je formułując przypuszczenie, że istotną i prawdopodobną przyczyną zmniejszenia skuteczności i równomierności działania hamulców pojazdów jest czas ekspozycji ich par ciernych na korozyjne czynniki atmosferyczne. W drugiej części tezy Doktorant zakłada, że jeżeli istnieje wpływ czasu ekspozycji w

warunkach korozyjnego oddziaływania czynników atmosferycznych na skuteczność działania par ciernych hamulca to zastosowanie kompozytów na bazie stopów lekkich na jeden z elementów pary trącej, jakim jest tarcza lub bęben hamulca może ten wpływ ograniczyć.

Ostatnia część tezy, dotycząca zmniejszenia emisji zanieczyszczeń środowiska produktami zużycia jest oczywista i nie stanowi istoty działań badawczych Doktoranta, – co widać z przedstawionych w recenzowanej pracy rezultatów badań - i moim zdaniem jest tylko niepotrzebnym ozdobnikiem przytoczonej wyżej tezy.

Reasumując, sformułowane w tezie cele badawcze stanowią jednocześnie program badań, który jest spójny z celami przedstawionymi w recenzowanej pracy doktorskiej (str.11) i są właściwe do jej potwierdzenia.

2.5 Realizacja pracy

Praca badawcza przebiegała zgodnie z przyjętym planem (rys.1), który zawierał następujące etapy pracy:

1. Wstępne badania eksploatacyjne w stacji kontroli pojazdów,
2. Badania laboratoryjne na stanowisku tribologicznym,
3. Badania na stanowisku dynamometrycznym,

2.5.1 Wstępne badania eksploatacyjne w stacji kontroli pojazdów

Pierwszym krokiem badawczym było pozyskanie informacji i materiału doświadczalnego z bieżącej eksploatacji szerokiej gamy pojazdów samochodowych. Badania dotyczyły ustalenia przyczyn niesprawności pojazdów, przy czym poszukiwano przede wszystkim materiału dowodowego w aspekcie skuteczności i równomierności działania hamulców (rys. 50 i 51), liczby przejechanych km (rys. 39 i 43) oraz stanu technicznego eksploatowanych w różnych warunkach otoczenia par ciernych (rys. 48 i 49). Wykorzystano w tym celu metodę wizualną oraz metody badań stosowane w stacjach diagnostycznych pojazdów (rys. 40 i 46). Próbkę badawczą stanowiły 263 pojazdy o DMC do 3,5t oraz 5 pojazdów o DMC powyżej 3,5t.

Z pozyskanych przez Doktoranta danych wynika, że niesprawności układu hamulcowego wystąpiły w 27,4% badanych pojazdów, przy czym w 23,5% ich przyczyną była korozja (str.78). Przeprowadzone przez Doktoranta obserwacje elementów par ciernych hamulców wskazują, że bezpośrednią przyczyną tego zjawiska jest sposób eksploatacji pojazdów uniemożliwiający usuwanie gromadzących się w mechanizmach hamulcowych warstw tlenków żelaza. Najmniejszy wpływ korozji na działanie układu hamulcowego zaobserwowano w grupie pojazdów dostawczych oraz pojazdów powyżej 3,5t DMC.

Ponadto badania wizualne wykazały, że na powierzchniach roboczych tarcz i bębnow hamulcowych pojazdów nieuczestniczących przez pewien czas w ruchu, pojawiają się dwa różne pod względem skorodowania obszary. Na powierzchniach par ciernych pojazdu przebywającego w środowisku o mniejszej wilgotności występuje obszar korozji zajmujący większą część bieżni tarczy lub bębna oraz obszar nieskorodowany odpowiadający polu zetknięcia się okładziny/klocka ciernego z bieżnią. Natomiast, jeżeli w środowisku wilgotnym występują inne czynniki takie jak: sól, preparaty przeciw oblodzeniowe czy opad kwaśnego deszczu, w parze cierniej zachodzi proces korozji elektrochemicznej skutkujący wżerami na metalowej bieżni tarczy hamulcowej. Nierównomierność zjawiska korozji w parach ciernych powoduje zróżnicowany przebieg współczynnika tarcia, co objawia się nierównomiernością sił hamowania w układach hamulcowych poszczególnych kół. Zgadzam się z przeprowadzoną na podstawie zebranych i zilustrowanych dowodów z eksploatacji samochodów analizą Doktoranta, że proces i przebieg korozji wpływa na obniżenie skuteczności hamownia par ciernych hamulców. Reasumując, przedstawione i udokumentowane statystyką badania eksploatacyjne na obserwowanej próbce pojazdów samochodowych potwierdziły przypuszczenie

Doktoranta, że prawdopodobną przyczyną zmniejszenia skuteczności i równomierności działania hamulców pojazdów jest czas ekspozycji ich par ciernych na korozyjne czynniki atmosferyczne.

Zawarta w części dyskusyjnej nad wynikami badań eksploatacyjnych konkluzja Doktoranta, co do zmiany obecnego sposobu oceny stanu układów hamulcowych pojazdu jest dla mnie niezrozumiała. *Proszę o wyjaśnienie stwierdzenia str. 82 cyt.: „Metodyka badań nie przewiduje jednak ustępstwa w tym zakresie, jak również nie dopuszcza wielokrotnego sprawdzania tego samego układu. Stanowi to wadę obecnego sposobu oceniania, ponieważ w sporadycznych przypadkach może prowadzić do wyeliminowania z ruchu sprawnych pojazdów.”*

2.5.2 Badania laboratoryjne na stanowisku tribologicznym

Celem tego etapu pracy było zbadanie wpływu czasu ekspozycji w warunkach wilgotnego oddziaływania atmosfery na właściwości tarciove par ciernych hamulców. Próbkami badawczymi były pary tarciove wykonane w postaci tarcz z żeliwa GJL-250 i żeliwa modyfikowanego oraz z kompozytów F3S.20S i AlSi18MgNiCu współpracujących z materiałem ciernym FO 701. Badania prowadzono na stanowisku badawczym wykorzystując model tarciovy trzpień-tarcza. Mierzono siłę tarcia metodą tensometryczną natomiast zużycie metodą wagową. Czynniki sterującymi były: czas ekspozycji pary tarciovej w wyżej opisanych warunkach, nacisk powierzchniowy, prędkość ślizgania. Przyjęto arbitralnie trzy czasy ekspozycji tj.: 0, 48, 240h, uzasadniając te wartości czasem oczekiwania na naprawę w punkcie serwisowym, trzy wartości prędkości ślizgania 0,1, 0,4, 0,7m/s pomiędzy nieruchomą próbką z materiału ciernego a tarczą oraz trzy wartości nacisku próbki z materiału ciernego na tarczę 0,3; 0,5, 0,7MPa. Badania realizowano według opracowanego przez Doktoranta poliselekcyjnego, D-optimalnego, cząstkowego planu eksperymentu wg. Hartley'a (Tabela 12). Przeprowadzono również przed i po eksperymentach tarciowych analizy fraktograficzne powierzchni tarcia (rys.74,75,78,80,81b,82,85,87) oraz analizy mikro (rys.54-57,79,81a) i makro strukturalne materiałów tarcz (rys.76,77,81b,83,84,86).

Rezultaty eksperymentów tarciowych przedstawiono w Tabelach 19-22, które ujęto graficznie w postaci trójwymiarowych powierzchni, jako zależności wartości: współczynnika tarcia, ubytku masy tarczy lub ubytku masy materiału ciernego od wartości wymuszeń: prędkości ślizgania, nacisku, czasu postoju (ekspozycji) dla wszystkich kombinacji par tarcia objętych planem (rys.58-69). Poszczególnym wyznaczonym powierzchniom odpowiadają czasy ekspozycji.

Ważnym elementem badań było wykazanie różnic w przebiegu współczynnika tarcia w parach ciernych w zależności od drogi tarcia oraz materiałów, z których były wykonane tarcze hamulcowe. Dla kompozytów, niezależnie od czasu ekspozycji, średnie wartości przebiegów współczynnika tarcia były zbliżone i oscylowały wokół wartości 0,25-0,35 (rys.70). Doktorant wyciąga wniosek, że czas ekspozycji tarczy kompozytowej nie wywiera statystycznie istotnego wpływu na proces tarcia w skojarzeniu. Zgadzam się z nim w kwestii interpretacji tego procesu, a mianowicie cyt. „*wytworzona warstwa tlenkowa jest na tyle cienka, że zostaje szybko usunięta*”. Natomiast w parze cierniej z żeliwem niemodyfikowanym, czas ekspozycji wynoszący 48h miał istotny wpływ na wartość tego współczynnika. Doktorant stwierdza, że tak duża niestabilność jest wynikiem współpracy materiału ciernego z powierzchnią żeliwa pokrytego miejscowo tlenkami (rys.74b), a dominującym procesem jest tarcie ściernie usuwające warstwy tlenków z żeliwa. Wraz ze wzrostem drogi tarcia wartość współczynnika tarcia zmieniała się z 0,2 aż do 0,6 (rys.71a). Z kolei w parze cierniej z żeliwem modyfikowanym dla wszystkich badanych ekspozycji wraz z drogą tarcia współczynnik dążył monotonicznie do wartości w przedziale 0,20-0,35, a więc podobnie jak dla kompozytów (rys. 71.b). W podrozdziale (str.106-112), Doktorant omawia różne aspekty zaobserwowanych procesów w przedmiotowych parach tarcia w zależności od nacisków, prędkości ślizgania, budowy utworzonych w czasie ekspozycji warstw tlenkowych, a więc czynników mających wpływ na cechy funkcjonalne par ciernych hamulca a mianowicie na wartość współczynnika tarcia i jego stabilność a w efekcie na

zużycie materiałów trących i stabilność procesu hamowania. Badania wykazały, że właściwości kompozytów z osnową stopów aluminium umożliwiają osiągnięcie wymaganej skuteczności i równomierności działania hamulców nawet po wielogodzinnym postoju pojazdu narażonego na działanie czynników atmosferycznych. Usunięcie powstałych cienkich warstw tlenkowych następuje przy nacisku klocka na tarczę odpowiadającą wartości ciśnienia w obwodzie hydraulicznym hamulców najczęściej występującym podczas ruchu miejskiego. Takie warunki w parze tarcia zapobiegają tworzeniu się narostów korozyjnych stanowiących jedną z przyczyn niesprawności hamulców pojazdów samochodowych, co wykazano w poprzednim rozdziale pracy.

Podsumowując tę część recenzji, stwierdzam, że przedstawione w pracy wyniki badań stanowiskowych oraz ich szczegółowa analiza wykazały, że czas postoju wpływa w odmienny sposób na skuteczność działania hamulców wyposażonych w żeliwne lub kompozytowe tarcze hamulcowe. Rezultaty badań tribologicznych upoważniają do rekomendowania materiałów kompozytowych na tarcze i bębny hamulcowe w miejsce powszechnie stosowanego żeliwa EN-GJL 250. Ponadto, na podstawie sposobu przeprowadzenia badań oraz ich skomentowania świadczą o dojrzałości badawczej Doktoranta.

2.5.3 *Badania stanowiskowe na urządzeniu dynamometrycznym*

Celem eksperymentu stanowiskowego było zbadanie wpływu czasu ekspozycji tarcz hamulcowych w warunkach korozji atmosferycznej na skuteczność procesu hamowania realizowanego w parze ciernej hamulca. Przyjęto warunki eksperymentu odpowiadające hamowaniu pojazdu poruszającego się w warunkach ruchu miejskiego. Eksperyment obejmował pomiary wartości masowego zużycia elementów pary ciernej hamulca samochodu. Pary cienne tworzyły tarcze hamulcowe wykonane z materiału kompozytowego typu siluminu $AlSi18MgNiCu$ zbrojonych wydzieleniowo cząstkami Si lub z żeliwa w gat. GJL-250 współpracujące z klockami o symbolu MBP 05312 wykonanymi z materiału cierneho charakteryzującego się niską zawartością stali. Przed badaniami, tarcze hamulca ekspozowano w komorze korozyjnej przez 240h. Narażenie korozyjne wywołano wodą zdemineralizowaną i prowadzono w temperaturze $40\pm 3^{\circ}C$ i wilgotności bliskiej 100%. Tak przygotowane tarcze montowano na stanowisku badawczym natomiast klocki w zacisku hamulca. Badania realizowano na stanowisku bezwładnościowym. Prędkość liniową tarczy względem klocka wyliczono na podstawie prędkości kątowej koła jezdneho wybranego typu samochodu wyposażonego w ogumienie o wymiarze 235/45R17 i poruszającego się z prędkością w zakresie 20-50km/h. Średnica tarczy hamulcowej wynosiła $280\pm 0,25mm$ zaś powierzchnia robocza każdego klocka $21,38mm^2$. W celu określenia wartości zużycia masowego, elementy pary trącej (tarczę i klocki) ważono przed i po każdej serii hamowań z niepewnością pomiaru $\pm 0,5g$.

W tej części recenzowanej pracy (rozdział 9.5), nie jest precyzyjnie opisana metodyka badania. Z zapisu (str.118) wynika, że jest wykonywana procedura docierania pary ciernej, ale kiedy? Przed czy po ekspozycji? Dopiero na str. 116 pracy jest informacja, kiedy i jak jest prowadzony proces docierania. W związku z tymi wątpliwościami, proszę o wyjaśnienie i przedstawienie metodyki badania na stanowisku bezwładnościowym, w tym uzasadnienie przyjętych ilości cykli hamowań w poszczególnych seriach oraz dlaczego przyjęto różne ilości hamowań w zależności od ciśnienia w układzie hamulca. Co należy rozumieć pod sformulowaniem „zachowanie tribologiczne” w zdaniu cyt. „Różnice w ilości cykli wynikały z zachowania tribologicznego” (str.118).

Ponadto, moim zdaniem, zbyt dużym uproszczeniem jest stwierdzenia (str.118) cyt. "W oparciu o analizę wyników z poprzedniej części pracy zdecydowano, że moment osiągnięcia stabilnej wartości przez średni współczynnik tarcia w skojarzeniu MBP0531/EN-GJL 250 będzie wyznacznikiem zakończenia każdej serii". Swoją wątpliwość uzasadniam tym, że w pracy nie porównano współczynników tarcia materiału cierneho FO701 z MBP0531 skojarzonych z żeliwem lub skojarzonych z kompozytami. Wynika więc że stabilną wartość współczynnika tarcia przyjęto

arbitralnie. W świetle powyższych wątpliwości prezentowane na rys. 91-94 wyniki badań wymagają dodatkowego wyjaśnienia Doktoranta.

Natomiast, zakładając poprawność przeprowadzonych eksperymentów, dość interesująco kształtują się wyniki masowego zużycia elementów par ciernych. Wyraźnie widać (rys.95a) że ubytek masowy eksponowanych tarcz kompozytowych jest zdecydowanie mniejszy niż żeliwnych dla różnych ciśnień w układzie hamulca. Również podobną tendencję wykazał materiał cierny klocka w skojarzeniu z eksponowaną tarczą kompozytową. Można w przybliżeniu przyjąć jego 30% mniejsze zużycie wagowe w skojarzeniu z kompozytem niż w skojarzeniu z tarczą żeliwną (rys.95b).

Na osobną uwagę zasługują wyniki badania stabilności siły hamowania dla różnych ciśnień w układzie hamulcowym (rys.100). Zauważa się, że wskaźnik stabilności siły hamowania dla eksponowanej tarczy kompozytowej monotonicznie dąży do stałej ale niższej wartości wraz z liczbą hamowań niż dla eksponowanej tarczy żeliwnej. Ta ostatnia wykazuje wraz z liczbą hamowań tendencję wzrostową.

W celu wyjaśnienia tak odmiennych przebiegów procesów tarcia pomiędzy eksponowanymi kompozytowymi tarczami hamulcowymi a żeliwnymi Doktorant przeprowadził badania metalograficzne (rys.101-103). W ich wyniku stwierdził odmienność w mechanizmie tworzenia się filmu ściernego na płaszczyźnie tarcia eksponowanych tarcz kompozytowych w odniesieniu do eksponowanych tarcz żeliwnych. W pierwszym przypadku na grubość tworzenia się warstwy filmu z produktów ścierania tarczy i materiału ciernego ma wpływ wartość ciśnienia w układzie hamulca. Większa wartość ciśnienia (3MPa) sprzyja tworzeniu się grubej warstwy filmu ciernego rozdzielającego współpracujące elementy co powoduje zmniejszenie ich zużycia. Przy mniejszym ciśnieniu (2MPa) tworzą się niewielkie odkształcenia plastyczne, warstwa filmu ciernego jest cienka i tworzy się głównie w bruzdach tarczy kompozytowej (rys. 101a-103a). Natomiast w odniesieniu do tarcz żeliwnych, proces zużycia ściernego jest bardziej intensywny i generuje większy ubytek masy materiału. Powierzchnia tarcia wykazuje liczne rysy, bruzdy i mniejsze obszary odkształceń plastycznych (rys.101b-103b).

Występujące różnice w poszczególnych przebiegach współczynnika tarcia badanych skojarzeń w zależności od szybkości usuwania z powierzchni tarcz produktów korozji, ciśnienia w układzie hamulca, wartości zużycia oraz innych występujących dodatkowo a zaobserwowanych zjawisk, zostały przez Doktoranta wyczerpująco skomentowane w rozdziale 9.5 recenzowanej pracy.

W konkluzji wyników badań stanowiskowych Doktorant stwierdził, że czas ekspozycji w warunkach korozji atmosferycznej na skuteczność hamowania wywiera znacznie mniejszy wpływ dla tarcz hamulcowych z siluminu $AlSi18MgNiCu$ niż dla tarcz z żeliwa EN-GJL 250. Produkty korozji z materiału tarczy kompozytowej znacznie szybciej były usuwane niż z tarczy żeliwnej o czym świadczy - mierzona ilością cykli przyhamowań - szybsza stabilizacja współczynnika tarcia (rys.92 i 94). Uzyskane wartości zużycia elementów par ciernych potwierdziły że, w warunkach prowadzonych badań ubytek masy kompozytu był 6÷12 razy mniejszy niż żeliwa. Podobnie zużycie klocków zmniejszyło się w zależności od ciśnienia hamowania o około 27% dla 2MPa do 54% dla 3MPa (rys. 95).

2.5.4 Podsumowanie wraz z wnioskami - rozdział końcowy pracy

Recenzowana praca kończy się syntetycznym omówieniem wyników pracy wraz wnioskami. Zredagowane przez Doktoranta treści wniosków są zasadne i potwierdzają wykonanie założonego programu badań. Rezultaty pracy wykazały zasadność postawionej tezy. Osiągnięto cel naukowy i użytkowy pracy.

Jednocześnie Doktorant wskazuje na potrzebę opracowania nowych rodzajów materiałów ciernych, charakteryzujących się wyższym współczynnikiem tarcia i znacznie lepiej przystosowanych do współpracy z metalowymi materiałami kompozytami.

2.6 Oryginalność naukowa pracy - główne osiągnięcia Doktoranta

Rozprawa doktorska mgr inż. Roberta Czecha jest pracą twórczą, wnoszącą praktyczny wkład w rozwój takich dziedzin nauki jak inżynieria mechaniczna i inżynieria materiałowa. Ściślej w obszar wzajemnego przenikania się tych dziedzin, wynikający z nowoczesnych technologii kształtowania cech użytkowych materiałów i elementów maszyn. Na uwagę zasługuje sposób zdefiniowania przez Doktoranta problemu badawczego, a mianowicie wykorzystał on wiedzę z badań eksploatacyjnych pojazdów przez co uzyskane wyniki pracy cechuje duża użyteczność.

Oryginalnością twórczą Doktoranta jest zauważenie i zbadanie problemu wpływu korozyjnych warunków atmosferycznych na skuteczność hamowania pojazdów. Doktorant precyzyjnie zdefiniował środowisko korozji oddziaływujące na tarczę cierną hamulca zawężając je do stanu pozbawionego wpływu innych korozyjnych czynników. Dzięki temu, prowadzone obserwacje powierzchni tarcia elementów par ciernych hamulców były niezaburzone wpływem tych czynników i pozwalały na obserwację tworzenia się warstw pośrednich w strefie tarcia dla eksponowanych tarcz z żeliwa EN-GJL 250 czy kompozytu AlSi18MgNiCu. Atutem pracy są też analizy wpływu parametrów procesu hamowania na fluktuacje współczynnika tarcia wywołane korozją dla różnych czasów ekspozycji korozyjnej.

Doktorant wykazał również, że wobec problemu korozji, elementy par ciernych hamulców wytworzone z przedmiotowych materiałów kompozytowych na bazie stopów lekkich posiadają korzystniejsze właściwości tribologiczne niż powszechnie stosowane tarcze żeliwne.

2.7 Uwagi krytyczne i inne kwestie do dyskusji

Zasadniczych nieścisłości w pracy nie stwierdzam. W treści recenzji oraz w niniejszym rozdziale przedstawiłem kwestie wymagające wyjaśnienia. Ponadto, są pewne sformułowania na które chciałbym zwrócić uwagę.

1. *W rozdziale 8.5 na str.91 pojawia się sformułowanie „funkcja eksploatacji”. Z treści rozdziału nie wynika czym jest to pojęcie i jaki ma ono sens fizyczny. Proszę Doktoranta o wyjaśnienie tego problemu.*
2. *Proszę o wyjaśnienie czym jest ekspozycja. Czy czasem narażenia na warunki otoczenia czy czasem postoju z zaciągniętym hamulcem (str.106).*
3. *We wniosku pierwszym str.128, użyto sformułowania „wywiera istotny wpływ na siły hamowania”. Jakie to są siły?*
4. *W pracy str. 10 występuje określenie „w warunkach rzeczywistych”. A „czy są nierzeczywiste? Można przyjąć określenie np. modelowe, określone. W tym zdaniu w odniesieniu do celów pracy bardziej oddaje sens sformułowanie „w warunkach otoczenia”. Razi również żargon typu „obiekty rzeczywiste” (str.11,114,115). A czy są w technice obiekty nierzeczywiste, urojone? Lepiej używać wyrazów: typowe, modelowe, specjalnie zaprojektowane itp.*
5. *Właściwym określeniem dla stanowiska „dynamometrycznego” jest nazwa „stanowisko bezwładnościowe” z powodu fizyki zachodzących procesów tj. zamiany energii kinetycznej wirującego ciała na inne formy energii podczas hamowania a nie z punktu widzenia wykorzystania dynamometru do pomiaru momentu tarcia.*
6. *W odniesieniu do schematu planu pracy rys.1 brakuje zaznaczenia, że badania stanowiskowe wykonane na obiektach pełnowymiarowych par tarcia hamulca są badaniami weryfikującymi spostrzeżenia z badań modelowych. Ponadto jeśli używa się określeń np. typu „low steel czy NAO lub AlMC” to należy wyjaśnić to określenie (str.21,rys.34). Praca doktorska ma być przede wszystkim dla odbiorców którzy chcą zapoznać się z istotą pracy aby pogłębić swoją wiedzę.*

7. Rys.38, błąd w oznaczeniu numerów elementów stanowiska badawczego. Dotyczy to numeracji rolek, jest 3,4 a powinno być 2,3.
8. Niezrozumiały jest zapis celu badań laboratoryjnych na str. 83 cyt. „określenie wpływu czasu ekspozycji na atmosferyczne czynniki korozyjne na właściwości tribologiczne wybranych materiałów przeznaczonych na tarcze hamulcowe”.
9. Str.121 – Zapis brzmi „Wpływ czasu ekspozycji na wybrane parametry hamowania (droga, opóźnienie) zamieszczono na rys.99”. Brak jest informacji w treści lub na rysunku jakiej czasowej ekspozycji dotyczą przedstawione zależności.

2.8 Ocena redakcyjna pracy

Recenzowana praca jest napisana w języku polskim. Sformułowania techniczne w zakresie merytorycznym są poprawne. Wykresy i zależności są za wyjątkiem ujętych w uwagach krytycznych właściwie opisane. Ogólnie można przyjąć, że rysunki i zdjęcia są czytelne. Układ treści i opracowanie edytorskie oceniam pozytywnie. Praca zawiera odwołania do cytowanej literatury. Nie zauważyłem istotnych usterek redakcyjnych.

3. Wnioski końcowe

Analiza przedstawionej do recenzji pracy wykazała, że jej realizacja przebiegała zgodnie z wytyczonym planem. Autor konsekwentnie w kolejnych krokach badawczych dążył do osiągnięcia założonych celów pracy. Wymienione uwagi krytyczne nie obniżają wartości merytorycznej pracy, mogą być dyskusyjne, ale nie zmieniają faktu, że Autor wykazał się umiejętnością rozwiązania zadania badawczego mającego znaczenie naukowe i aplikacyjne.

Potrafi poprawnie zaplanować i wykonać eksperymenty naukowe oraz przeprowadzić właściwą analizę wyników.

Biorąc pod uwagę oryginalność podjętego tematu, sposób jego rozwiązania oraz uzyskane rezultaty, stwierdzam, że recenzowana praca doktorska Pana mgr inż. Roberta Czecha spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim na stopień doktora nauk technicznych określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Stawiam wniosek o dopuszczenie Pana mgr inż. Roberta Czecha do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Włodek Strzemiński