

Dr hab. Agnieszka Merkisz-Guranowska, prof.PP

Politechnika Poznańska
Instytut maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań
E-mail: agnieszka.merkisz-guranowska@put.poznan.pl

Poznań, 17.12.2015

O C E N A

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Zbigniewa Skorupki

**pt. *Wpływ temperatury tarczy na moment hamowania
ciernego hamulca pojazdu mechanicznego***

podstawa opracowania: pismo nr DN/47/2015 Pełnomocnika Dyrektora ds. Rozwoju
Naukowego Pracowników Instytutu Lotnictwa w Warszawie z dnia 7 grudnia 2015

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Jak powszechnie wiadomo hamulce należą do głównych układów bezpieczeństwa we wszystkich pojazdach mechanicznych. Stanowią one standardowe wyposażenie między innymi w pojazdach samochodowych, jednośladowych, szynowych oraz samolotach (wymogi prawne w trakcie homologacji). W przypadku ostatniego z wymienionych typów pojazdów należy zasygnalizować, że cierne hamulce stosowane w lotnictwie muszą cechować się dużą wydajnością i skutecznością działania, wynikającymi z dużych ilości energii powstałej w trakcie lądowania samolotu, przy jednoczesnym zachowaniu kompaktowej konstrukcji i jak najmniejszej masy. Ciężkie warunki pracy powodują, że w wysoko obciążonych hamulcach pojazdów mechanicznych, poza specyficzną budową, musi znaleźć zastosowanie właściwy materiał na parę cierną, charakteryzujący się stabilnym i odpowiednim współczynnikiem tarcia w konkretnych warunkach hamowania, dobrymi parametrami wytrzymałościowymi, małą ścieralnością oraz dużą odpornością na wysoką temperaturę.

Ze względu na techniczną istotność problemów związanych ze stosowaniem hamulców od wielu lat prowadzi się szereg prac badawczo-rozwojowych, mających na celu w głównej mierze pogłębienie stanu wiedzy na temat zjawisk zachodzących podczas procesu hamowania. To z kolei prowadzi do optymalizacji rozwiązań w aspekcie zastosowań praktycznych. Dawniej podstawą wspomnianych prac badawczo-rozwojowych były badania laboratoryjne. Obecnie, w wyniku zaistnienia gwałtownego rozwoju techniki komputerowej, inżynierowie skupiają się na modelowaniu procesów hamowania, zmniejszając tym samym swe zainteresowanie badaniami laboratoryjnymi (stanowiskowymi).

Autor ocenianej rozprawy doktorskiej, posiłkując się wieloletnim doświadczeniem

zawodowym i dorobkiem pracowników Laboratorium Podwozi Lotniczych Instytutu Lotnictwa w Warszawie z zakresu badań hamulców, podjął się szczegółowej analizy (badania modelowe i symulacyjne) dotyczącej oceny wpływu temperatury tarczy hamulcowej m.in. na moment hamowania wybranego ciernego hamulca pojazdu mechanicznego. W dalszym kroku umożliwiło to opracowanie modeli procesu hamowania. Użyta do tego celu aparatura pomiarowa i oprogramowanie zostały przez mgr. inż. Zbigniewa Skorupkę umiejętnie wyselekcjonowane spośród różnych urządzeń i rozwiązań stosowanych przez światowych badaczy.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Zbigniewa Skorupki liczy 142 strony i składa się ze streszczeń w języku polskim i angielskim, spisu rysunków i tabel, wykazu ważniejszych oznaczeń, 11 głównych rozdziałów oraz bibliografii obejmującej 90 pozycji, w tym większości obcojęzycznych. Aktualność (z kilkoma wyjątkami) cytowanej w pracy literatury świadczy o bardzo dobrym rozeznaniu Autora w tematyce rozprawy.

W rozdziale 1 – *Wstęp* zawarto podstawowe informacje na temat układów hamulcowych, stosowanych powszechnie w lotnictwie i motoryzacji w pojazdach przeznaczonych do przewozów pasażerskich i towarowych, ze szczególnym zwróceniem uwagi na konstrukcję i eksploatację hamulców tarczowych.

Rozdział 2 zawiera informacje dotyczące, występujących w literaturze, rozwiązań tarczowych hamulców ciernych (wykonanych także z nowoczesnych materiałów kompozytowych) i problemów pojawiających się w trakcie eksploatacji przedmiotowych hamulców (w tym m.in. zjawisko fadingu, niestabilność termoelastyczna hamulca, deformacje termosprężyste tarczy hamulcowej). Przytoczono dostępne wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych, wykorzystujących nowoczesne oprogramowanie.

Po tezie i celu pracy (rozdziały 3 i 4), szczegółowo zaprezentowano w rozdziale 5 zagadnienia związane z przyjętą metodyką badawczą. Dotyczyły one w szczególności wykorzystywanych stanowisk pomiarowych do następujących badań: modelowych (stanowisko bezwładnościowe IL-68) oraz pełnowymiarowego hamulca (stanowisko bezwładnościowe M3T). Ponadto zaprezentowano sposoby pomiaru temperatury – kluczowego dla podjętej w pracy analizy parametru. Opisano metodę stykową, wykorzystującą termopary, oraz dwie metody bezstykowe, wykorzystujące pirometr i kamerę termowizyjną.

Rozdział 6 zawiera wyniki badań eksperymentalnych, przeprowadzonych na ww. stanowiskach. Dokonano rejestracji przede wszystkim takich parametrów, jak: siła hamowania, moment hamowania, prędkość obrotowa, temperatura.

W rozdziale 7 przedstawiono koncepcje dwóch autorskich modeli procesu hamowania (tarczowy hamulec cierny). Był to model numeryczny, opracowany przy wykorzystaniu metody elementów skończonych (MES), oraz model matematyczny, uzyskany w wyniku zastosowania metody przybliżania krzywych momentu hamowania i temperatury materiału ciernego. Wyniki analiz symulacyjnych porównano następnie z wynikami badań eksperymentalnych (rozdział 8).

Rozdział 9 stanowi prezentację zagadnień związanych z błędami, możliwymi do wystąpienia zarówno na etapie prowadzenia prac badawczych, jak i obliczeniowych. W dwóch ostatnich rozdziałach pracy (10 i 11) dokonano jej krótkiego podsumowania wraz z przedstawieniem najważniejszych wniosków z przeprowadzonych prac oraz ich dalszych kierunków.

2. OCENA ROZPRAWY

Jak już wspomniano recenzowana praca doktorska poświęcona jest zagadnieniom związanym z problematyką budowy i badań tarczowego hamulca ciernego oraz analizie wpływu temperatury tarczy hamulcowej na przebieg momentu hamowania w tego rodzaju hamulcu pojazdu mechanicznego. Zmiany przebiegu momentu hamowania w funkcji czasu, spowodowane wzrostem temperatury, i co za tym idzie, spadkiem współczynnika tarcia, zmieniają efektywność procesu hamowania. Ocena przedmiotowej efektywności stanowi jeden z celów naukowych pracy. Należy w tym miejscu stwierdzić, że tematyka pracy, jej cele i zakres są wybrane trafnie. Podjęty w rozprawie problem jest aktualny i ważny nie tylko z naukowego, lecz także praktycznego punktu widzenia. Opracowana kompleksowa i autorska metoda badawcza może z powodzeniem znaleźć zastosowanie w trakcie obserwacji wielu zjawisk zachodzących w strefie tarcia hamulca ciernego, trudnych do stwierdzenia powszechnie dostępnymi prostymi metodami pomiarowymi.

Wartość merytoryczną ocenianej rozprawy podnosi dokonana przez jej Autora szeroka analiza stanu wiedzy związanej z tematyką zjawisk zachodzących w strefie tarcia, materiałów ciernych, kompletnych hamulców, a także zagadnień związanych z ich badaniami laboratoryjnymi i symulacjami numerycznymi.

Przedłożona przez mgr. inż. Zbigniewa Skorupkę rozprawa doktorska zawiera oryginalne ujęcie problemu naukowego i świadczy o opanowaniu przez jej Autora naukowych metod eksperymentalnych, analitycznych i numerycznych stosowanych w dyscyplinie *Budowa i eksploatacja maszyn*. Autor w dysertacji podjął się ambitnego zadania, które z oczywistych względów nie wyczerpuje całości zagadnień związanych m.in. z modelowaniem podzespołów układów hamulcowych pojazdów mechanicznych.

Pod względem merytorycznym rozprawa nie budzi większych zastrzeżeń. Analizując jej treść, można jednak zauważyć pewne usterki i niedociągnięcia, wśród których wymienić można:

Uwagi ogólne:

1. Z uwagi na to, że dokładność pomiarowa pirometru wynosi m.in. $\pm 0,75^{\circ}\text{C}$ nieuzasadnione jest podawanie zmierzonej wartości temperatury z dokładnością do części setnych ułamków dziesiętnych.
2. Każde wprowadzenie termopary w trakcie wykonywania pomiarów zmienia pole temperatury, a zatem nieco jej wartość. Należy o tym pamiętać podczas dokonywania analizy wyników badań i wyciągania wniosków.
3. W ocenianej rozprawie brakuje podsumowań i zbiorczej analizy wyników pomiarów na końcach rozdziałów dotyczących wykonanych prac, w tym badawczych.
4. W eksperymentalnych pomiarach temperatury wykorzystuje się urządzenia o różnorodnej dokładności, zależnej od przyjętej metody badań (stykowa, bezstykowa). Przykładowe oszacowanie niepewności pomiarów wykonanych na stanowiskach badawczych z pewnością stanowiłoby cenną informację i podniosło wartość merytoryczną ocenianej pracy.

Uwagi szczegółowe:

1. Praca zawiera niewielką liczbę niedociągnięć redakcyjnych.
2. Zdarzają się w rozprawie bardzo krótkie, jednozdaniowe akapity tekstu (np. str. 17, 89), co może nieco utrudniać odbiór jej treści przez czytelnika.
3. W pracy zdarza się błędny zapis jednostek po wartościach liczbowych – bez spacji, np. str. 37, 40 („1000Hz”, „0,05K/K”), 42 („25kl/s”).
4. Zamiast zapisu jednostki prędkości obrotowej „rpm” (występującej w j. angielskim) należałoby zastosować np. zapis „obr/min” (por. tab. 6.9).
5. Wygodniejsze w odbiorze treści pracy byłoby przedstawienie wartości momentu hamowania w jednostce „Nm” a nie „daNcm”.
6. Zaobserwowano niejednorodne stosowanie w tekście pracy myślników i dywizów (np. str. 25–27; przykładowo: „żeliwo–kompozyt”, „klocek-tarcza”).
7. Zaobserwowano niejednorodne stosowanie w tekście pracy zapisu „°C” (por. str. 22 i 26).
8. Niektóre wyrazy w języku angielskim poprzedza zapis „ang.”, a niektóre nie – por. str. 20 i 38.
9. W pracy występuje czasami niejednorodny sposób zapisu zakresów wartości liczbowych, por. np. tab. 5.1 i 5.3.
10. Str. 8 – zapis cyfry „5” przed wartością „0,510” jest błędny (dot. podpisu rys. 6.12).
11. Str. 9 i 83 – w podpisie rys. 6.37 powinno widnieć „(rys. 6.17)” a nie „(rys. 6.7)” bo ten dotyczy próby 010.
12. Str. 12 – zamiast „tarczy hamulcowe” powinno być „tarczy hamulcowej”.
13. Rys. 1.1 – w podpisie rysunku występuje niejednorodna czcionka.
14. Brak odniesień do literatury w przypadku niektórych rysunków (np. 1.1–1.3, 5.4, 5.5); w opinii recenzenta prawdopodobnie nie są to zdjęcia i opracowanie autorskie.
15. Str. 22–23 – występuje różny zapis dotyczący oprogramowania: „ABAQUS” i „ABACUS”.
16. Str. 23 – tzw. literówka – „FULENCIE”.
17. Rys. 5.1, 6.39 i in. – z uwagi na czytanie tekstu od lewej do prawej wygodniejsze w odbiorze treści byłoby stosowanie w podpisach pod rysunkami (zdjęciami), które zawierają dwa obiekty, właśnie takiej kolejności.
18. Tab. 5.1 – zapisana jednostka wskazuje na to, że Autor chyba miał na myśli moment bezwładności a nie „moment obrotowy”.
19. Str. 38 – brak oznaczenia jednostki w zapisie: „(długość fali pomiędzy 1 μ a 20 μ m)”.
20. Tab. 5.2 – zaobserwowano niejednorodny zapis jednostki „°C” po wartości liczbowej.
21. Tab. 5.6 – właściwszy byłby zapis 3000 kg a nie „3 T”.
22. Str. 53 – zamiast stwierdzenia „Na rysunkach 6.6–6.33 przedstawiono...” powinno być „Na rysunkach 6.4–6.33 przedstawiono...”, stąd brakuje odniesienia w tekście pracy do rys. 6.4 i 6.5.
23. Równania (7.8) i (7.9) – niejednorodny zapis; w opinii recenzenta w tym pierwszym powinno być oznaczenie „A_s”.
24. Tab. 7.2 – jednostką gęstości powinien być „[kg/m³]” a nie występujący w pracy „[kgm³]”.
25. Równanie (7.32) – poprawniejszy byłby zapis „M_g – zespół właściwości gazu” a nie „M_g – zespół własności gazu”.
26. Rys. 7.7, 7.8, 7.10, 7.12 – błędny zapis jednostek – kwestia rodzaju nawiasów.

27. Rys. 7.8, 7.10 i 7.12 – praca została napisana w języku polskim, stąd napisy na rysunkach powinny być również w tym samym języku.
28. Str. 135 – „zakłócenia” należą do rzeczowników policzalnych, stąd powinien być zapis „liczby zakłóceń” a nie „ilości zakłóceń”.
29. W bibliografii występuje niejednorodny zapis wyrazów: „Fisita” i „Kones”; spotyka się bowiem zapis wersalikami.
Inne uwagi naniesiono bezpośrednio w tekście pracy.

Mimo tych uwag krytycznych, niektórych dyskusyjnych, wysoko oceniam poziom merytoryczny rozprawy, i to zarówno ze względu na intelektualny wkład jej Autora, jak i na zakres włożonej przez Niego pracy. Na podkreślenie zasługuje oryginalnie i twórcze podejście do kwestii modelowania elementów składowych układów hamulcowych pojazdów mechanicznych m.in. w postaci samolotów i samochodów. Metodyka badań oraz otrzymane wnioski z badań eksperymentalnych i symulacyjnych stanowią w znacznej części oryginalny wkład Autora.

Osiągnięcia pracy:

- Syntetyczne opracowanie rozwiązań hamulców stosowanych w pojazdach mechanicznych, tj. w statkach powietrznych i samochodach ze szczególnym uwzględnieniem różnic pomiędzy hamulcami tarczowymi i bębnowymi, oraz z uwzględnieniem układów sterowania.
- Dokonanie analizy stanu wiedzy związanej z tematyką zjawisk zachodzących w strefie tarcia, materiałów ciernych, kompletnych hamulców, a także zagadnieniami związanymi z ich badaniami laboratoryjnymi i symulacjami numerycznymi.
- Opracowanie oryginalnej metodyki badań na stanowisku do badań modelowych z uwzględnieniem pomiarów temperatury trzema metodami badawczymi (termopara, pirometr, kamera termowizyjna).
- Opracowanie metodyki badań temperatury na stanowisku do badań kompletnych zespołów hamulcowych za pomocą pirometru.
- Opracowanie modelu numerycznego procesu hamowania modelowego w oparciu o adaptację programu COMSOL Multiphysics, w którym danymi wejściowymi są dane uzyskane w badaniach (moment hamowania, siła docisku, prędkość obrotowa), a danymi wyjściowymi są rozkłady temperatury na powierzchni modelowanego obiektu.
- Wykonanie obliczeń numerycznych rozkładu temperatury na powierzchni hamulca za pomocą metody elementów skończonych.
- Wyjaśnienie zjawiska spadku momentu hamowania i jego ponownego wzrostu do poziomu równowagi związanego ze zmianą współczynnika tarcia w funkcji temperatury.
- Opracowanie modelu matematycznego metodą przybliżania krzywych momentu hamowania i temperatury materiału ciernego.
- Wykonanie analizy błędów modelu matematycznego w oparciu o adaptację programu Origin.
- Wykonanie analizy błędów obliczeń numerycznych względem zmierzonego przebiegu temperatury na powierzchni próbki cierniej metodą porównania przebiegów rzeczywistego i numerycznego.

Reasumując, wszystkie wymienione w recenzji elementy pracy stanowią o jej dużej wartości merytorycznej. Na uwagę zasługują zwłaszcza następujące aspekty:

- uzasadnienie podjęcia tematu, które wynika z bardzo wnikliwej analizy stanu wiedzy,
- precyzyjne zdefiniowanie przedmiotu badań i celu rozprawy,
- dobry poziom merytoryczny pracy i obeznanie z rozważaną tematyką,
- przeprowadzenie badań modelowych i identyfikacyjnych w zakresie rozważanej tematyki,
- konsekwencja w definiowaniu pojęć naukowych i duży nacisk na poprawne i jednoznaczne stosowanie terminów i określeń naukowych z szeroko pojętego obszaru konstrukcji i eksploatacji układów hamulcowych,
- umiejętność korzystania z literatury specjalistycznej, w tym pozycji literatury światowej,
- dbałość o poziom merytoryczny i edytorski pracy,
- przejrzysta i logicznie ułożona struktura pracy oraz jej cel i zakres.

3. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że:

- Autor dokonał trafnego wyboru tematyki swojej pracy, a jej zakres spełnia stawiane wymagania,
- zasadnicze cele pracy zostały w pełni osiągnięte w zakresie przyjętym przez Doktoranta, bowiem uzasadnione zostały twierdzenia Autora ujęte w tezie pracy, a prezentowane wyniki są uzyskane w poprawnie przeprowadzonych studiach i eksperymentach własnych i mogą służyć do dalszych prac,
- formalny układ pracy jest prawidłowy; należy podkreślić, iż cechuje ją wyjątkowo staranna strona edytorska i bardzo poprawny język,
- dysertacja dobrze nawiązuje do aktualnej wiedzy i praktyki, a w niektórych elementach wnosi do nich nowe treści,
- znaczna akumulacja należycie ustalonych faktów sprawia, że zostało spełnione kryterium logicznej poprawności pracy.

Powyższe fakty świadczą o dobrych kompetencjach Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej *Budowa i eksploatacja maszyn*, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

Stwierdzam zatem, że praca mgr. inż. Zbigniewa Skorupki pt. *Wpływ temperatury tarczy na moment hamowania ciernego hamulca pojazdu mechanicznego* (promotor: prof. dr hab. inż. Antoni Jankowski) spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, w rozumieniu ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku, a Autor może być dopuszczony do jej publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny rozprawy i zawarte w niej osiągnięcia naukowe, a także aplikacyjne, oraz poziom edytorski wnioskuję o jej wyróżnienie.

Agata Polin