

dr hab. inż. Mirosław KOWALSKI, prof. nadzw.
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
01-494 Warszawa
ul. Księcia Bolesława 6.

Warszawa 30.12.2015.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

(na zlecenie Rady Naukowej Instytutu Lotnictwa w Warszawie
- pismo DN/48/2015 z dnia 07 grudnia 2015 r.)

Tytuł rozprawy: WPŁYW TEMPERATURY TARCZY NA MOMENT
 HAMOWANIA CIERNEGO HAMULCA POJAZDU
 MECHANICZNEGO.

Autor rozprawy: mgr inż. Zbigniew SKORUPKA

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Antoni JANKOWSKI

1. Charakterystyka pracy

Podjęta problematyka rozprawy doktorskiej mgr. inż. Zbigniewa Skorupki wychodzi naprzeciw współczesnym potrzebom w zakresie bezpiecznego użytkowania statków powietrznych, pojazdów mechanicznych kołowych oraz szynowych. Wynika to tego, że układy hamulcowe należą do najistotniejszych, bez których użytkowanie wszelkiego typu pojazdów naziemnych oraz statków powietrznych nie byłoby możliwe. W pojazdach naziemnych decydują o ich bezpiecznym ruchu z określoną prędkością lub postoju, natomiast w statkach powietrznych o możliwościach bezpiecznego lądowania oraz kołowania i zatrzymania.

Rozprawa ma charakter analityczno-eksperymentalny oparty m.in. o analizy wyników badań przeprowadzonych na stanowisku bezwładnościowym IL-68 przeznaczonym do badań modelowych próbek ciernych oraz na bezwładnościowym stanowisku M3T przeznaczonym do badania kompletnych hamulców. Przy czym badania modelowe oparto o metodyki, których zasadniczym celem było przeprowadzenie pomiarów podstawowych parametrów procesu hamowania, w tym pomiary tworzących się temperatur w badanych parach ciernych. Opracowane, autorskie metodyki pomiarów temperatur zrealizowano przy wykorzystaniu termopar, pirometru i kamery termowizyjnej, przy czym metodyka z wykorzystaniem pirometru została wykorzystana do ciągłego pomiaru temperatury. Jest to nowatorskie rozwiązanie, dotychczas nie stosowane przy badaniach procesów hamowania. Badania kompletnych zespołów hamulcowych

zrealizowano z wykorzystaniem tylko pirometru, co wynikało z braku możliwości dokonywania modyfikacji badanego hamulca pod kątem montażu termopar oraz ze względu na brak miejsca i zbyt duże niebezpieczeństwo uszkodzenia kamery termowizyjnej. Wszystkie wykonywane pomiary rejestrowane były za pomocą komputera pomiarowego i zapisywane w postaci plików danych niezbędnych do dalszych ich obróbki. Natomiast obróbka danych oraz ich prezentacja graficzna zostały zrealizowane z wykorzystaniem standardowego oprogramowania Microsoft Excel. Jedynie prezentacje graficzne wyników pozyskanych z kamery termowizyjnej typu FLIR ResearchIR zrealizowano przy wykorzystaniu standardowego oprogramowania udostępnianego przy zakupie kamery.

Na tej podstawie przeprowadzono niezbędne analizy oraz dokonano wnioskowania o charakterze przebiegów podstawowych parametrów procesu hamowania, ze szczególnym podkreśleniem przebiegów temperatur i momentów hamowania. Ponadto sformułowano model teoretyczny hamulca tarczowego na bazie modelu współpracy ciernej modelowej pary ciernej. Argumentem za takim podejściem była prostota tego typu modelu współpracy ciernej – opartej o jedną parę cierną - oraz możliwość uzyskiwania powtarzalnych wyników w badaniach stanowiskowych. Bardzo istotnym elementem rozprawy jest opracowany model obliczeniowy z wykorzystaniem metody elementów skończonych, który posłużył do przeprowadzenia badań symulacyjnych tj. wyznaczenia teoretycznych przebiegów temperatury w procesie hamowania modelowego. Uzyskane wyniki porównano z wynikami prób na stanowisku badawczym, co posłużyło do zweryfikowania opracowanego modelu teoretycznego. Dodatkowo, dość ciekawym podejściem do procesów modelowania jest opracowanie modelu matematycznego poprzez wyznaczenie krzywej na bazie równania momentu i temperatury hamowania z wykorzystaniem oprogramowania OriginLab stosowanego do analiz matematycznych. W rezultacie otrzymano równania cząstkowe opisujące funkcje przebiegu momentu i temperatury hamowania w zależności od czasu trwania tego procesu. Na zakończenie przeprowadzono analizę błędów popełnianych podczas prowadzonych badań oraz symulacji, gdzie wskazano główne źródła ich popełniania i na tej podstawie, obszary stosowania poszczególnych metod badawczych i symulacyjnych, z punktu widzenia ich niepewności.

Przeprowadzone badania wykazały dużą skuteczność takiego podejścia, a dane uzyskane z modeli teoretycznych i podczas badań eksperymentalnych są na poziomie zbliżnym. Pozwala to na dość efektywne prowadzenie analizy pracy par ciernych hamulców podczas procesu hamowania.

2. Cel badań – teza rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa za cel główny podaje próbę określenia korelacji pomiędzy nagrzewaniem się tarczy tarczowego hamulca pojazdu mechanicznego i momentem hamowania generowanego w tym hamulcu. Takie sformułowanie celu głównego było wynikiem stwierdzenia, że analiza zależności temperatury tarczy hamulca ciernej w odniesieniu do momentu hamowania tego samego hamulca pozwoli na podjęcie

próby oceny jej doraźnego wpływu na charakterystyki eksploatacyjne hamulca, czy też zachowanie się samego materiału ciernego wykorzystanego w tym hamulcu. Ponadto, tego typu ocena – według Doktoranta – pozwoli na zdefiniowanie lub rozwinięcie w przyszłości ogólnych wytycznych dotyczących konstrukcji hamulca, ze zwróceniem szczególnej uwagi na właściwości termiczne materiału ciernego, a także na sposób użytkowania hamulca.

Kolejny cel rozprawy postawiony przez Doktoranta to próba przeanalizowania zjawiska nagłego spadku momentu hamowania oraz jego powrotu do stanu równowagi podczas jednokrotnego hamowania z dużą energią i stałą siłą dociskającą.

Zjawisko to zaobserwowane zostało przez Doktoranta podczas badań stoiskowych (eksperymentalnych) i nigdy wcześniej nie było wyjaśniane w literaturze przedmiotu.

W każdym razie - uwzględniając w szczególności cel główny niniejszej dysertacji - Autor przyjął następującą tezę pracy:

„...podczas procesu hamowania występująca zmiana momentu hamowania jest efektem zmiany temperatury tarczy wirującej, co zmienia współczynnik tarcia, a w związku z tym – obciążenie cieplne tarczy hamulcowej. W wyniku zmian obciążeń cieplnych następuje zmiana temperatury tarczy wirującej i powrót do stanu równowagi.”.

W moim przekonaniu, tytuł rozprawy, teza i cele zostały sformułowane w sposób przejrzysty i jasny. Jedynym mankamentem jest brak jednoznacznego podziału prezentowanych celi na cel użytkowy, którym praktycznie jest cel głównym rozprawy, cel badawczy, który winien uwzględniać zrealizowane badania eksperymentalne oraz cel naukowy, których efektem końcowym są opracowane modele matematyczne.

Na potrzeby realizacji przyjętej tezy oraz celów Autor opracował metodyki i wykonał autorskie badania eksperymentalne, uwzględniające pomiary temperatury par ciernych podczas procesu hamowania z wykorzystaniem trzech metod pomiarowych. Ponadto Doktorant opracował modele: teoretyczny i numeryczny, służące głównie do określenia związków korelacji między tworzącymi się temperaturami par ciernych, a momentem hamowania.

Autor wykazał się przy tym dużą umiejętnością w efektywnym wykorzystywaniu aparatu matematycznego, w tym metody elementów skończonych. Umiejętność ta pozwoliła Autorowi na efektywne wykorzystanie platformy programowej COMSOL Multiphysics w wersji 5 podczas opracowywania modelu numerycznego do przeprowadzenia symulacji nagrzewania się pary cierniej podczas hamowania.

Pozwoliło to Autorowi na osiągnięcie przyjętych celi dysertacji, czyli określeniu wpływu nagrzewania się par ciernych podczas hamowania na uzyskiwany moment hamowania.

Na uznanie zasługuje również część praktyczna, podczas której Autor przebadął pary cierne hamulców oraz kompletne zespoły hamulcowe i na tej podstawie opracował i zweryfikował opracowane modele matematyczne. Tym samym udowodnił postawioną tezę rozprawy, co jest zasadniczym celem każdej rozprawy doktorskiej.

Muszę jednak wskazać pewną nieścisłość, którą popełnił Doktorant, gdyż stwierdził, że wnioski końcowe zostały sformułowane na podstawie celi oraz tezy pracy (ostatni akapit

str. 32 rozprawy), a jak wiadomo, istotą każdej rozprawy doktorskiej jest udowodnienie założonej tezy pracy, bądź jej odrzucenie. Teza każdej pracy, to kwintesencja przemyśleń na wybrany temat – serce każdej pracy doktorskiej i im bardziej jest innowacyjna, tym praca jest ciekawsza, interesująca. Natomiast osiągnięcie przyjętych celów służy ostatecznie udowodnieniu postawionej (założonej) tezy pracy.

3. Sposób przeprowadzenia analizy źródeł i formułowania wniosków

Recenzowana rozprawa zawiera 90 pozycji literaturowych, spośród których zdecydowana większość została opublikowana w ciągu ostatnich dwóch dekad. Zakres tematyczny należy uznać za właściwy do realizacji niniejszej rozprawy.

Pragnę jednak nadmienić, że zamieszczony wykaz literaturowy nie jest pełny w stosunku do zapisów w tekście rozprawy, czego przykładem jest np. odwołanie się - przy opisie tarcia suchego - do prostej teorii mechanicznej Amontonsa z XVII wieku (str. 93), teorii molekularnej Tomlisona (str. 93) i Deriagina (str. 94), czy też przy opisie energetycznej teorii tarcia – do jednej z hipotez autorstwa Kosteckiego (str.95). Natomiast w spisie literaturowym brak jest pozycji, z których zaczerpnięto informacje o tych teoriach – stąd wniosek, że nie wszystkie pozycje literaturowe zostały zapisane.

Należy dodatkowo podkreślić, że przegląd literaturowy oprócz pozycji krajowych zawiera wiele pozycji o zasięgu międzynarodowym. Można zatem stwierdzić, że przeprowadzona analiza źródeł - literatury przedmiotu - jest wystarczająco obszerna.

W dodatku, sformułowane wnioski z analizy literatury przedmiotu są przedstawione w sposób jasny i prawidłowy oraz świadczą o dużej wiedzy Autora w podjętej tematyce.

4. Rozwiązanie postawionego zadania w rozprawie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy ogółem 142 strony. Składa się ze streszczenia pracy, spisu rysunków i tabel, wykazu ważniejszych oznaczeń, jedenastu rozdziałów i bibliografii. W sumie praca zawiera 70 rysunków i 20 tabel.

Wykaz ważniejszych oznaczeń jest niekompletny i dodatku nie opisuje wszystkich znaczeń dotyczących jednego oznaczenia jak np. literkę „T” opisano jako temperatura, a tekście rozprawy występuje również jako oznaczenie siły tarcia. Ponadto brak jest jednostek przy opisach poszczególnych oznaczeń. Uważam, że wskazane byłoby również rozdzielenie wykazu na oznaczenia i indeksy oddzielnie. co istotnie poprawiłoby ich czytelność.

Rozdział 1 jest zarazem wprowadzeniem w tematykę pracy, w której Autor dokonał opisu podstawowych układów hamulcowych spotykanych w lotnictwie oraz pojazdach naziemnych. Opisał podstawowe różnice konstrukcyjne pomiędzy hamulcami tarczowymi i bębnowymi oraz ich zasady pracy. Wskazał na różnice pomiędzy instalacjami hamulcowymi stosowanymi w pojazdach naziemnych i statkach powietrznych. Ponadto

przedstawiono zasady optymalnego doboru par ciernych do określonych warunków hamowania. W sumie rozdział ten zawarto na 5 stronach rozprawy.

W rozdziale 2 pt.: „Analiza stanu wiedzy”, Autor dokonał przeglądu dostępnej literatury przedmiotu. Przeprowadzona analiza jest dogłębna i bardzo szeroka, co świadczy o dużej wiedzy Doktoranta w zakresie przedmiotowym. Ponadto wskazał obszary wiedzy w tym zakresie, które wymagają rozpoznania, przez co dokonał uzasadnienia wyboru tematu rozprawy doktorskiej.

Rozdział 3 to „Teza pracy”, której brzmienie oraz opis przedstawiono na dwóch stronach rozprawy. Przy czym opis poprzedzający jej brzmienie uważam za zbyt szeroki i w zasadzie stanowiący dalszy przegląd literatury przedmiotu opisany już dość precyzyjnie w rozdziale drugim rozprawy. Ponadto, pojawia się tutaj stwierdzenie, które wskazuje na błędne traktowanie tezy pracy przez Doktoranta. W ostatnim akapicie tego rozdziału Autor stwierdza, że bada tezę, a nie dąży do jej udowodnienia. Co prawda, aby udowodnić tezę pracy należy zbadać wszystkie zjawiska, których wyniki potwierdzą lub nie przyjął tezę pracy – stąd zapewne ta nieścisłość.

W rozdziale 4 pt.: „Cel i zakres pracy”, Autor przedstawił dwa cele rozprawy oraz skrótowo dokonał opisu zakresu pracy. Opis ten jest jednak pewnego rodzaju streszczeniem, a nie typowym opisem zawartości poszczególnych rozdziałów, poruszanych zagadnień. Rozdział ten zajmuje dwie strony rozprawy. Uważam jednak, że niniejszy rozdział jak i poprzedni dotyczący tezy pracy powinny zostać połączone w jeden, co się często spotyka w tego typu pracach.

W rozdziale 5 pt.: „Metody badawcze” Autor opisał stanowisko bezwładnościowe IL-68 do badań modelowych okładzin ciernych stosowanych w parach ciernych hamulców oraz stanowisko do badań pełnowymiarowych M3T, na którym przebadano kompletny zespół hamulca lotniczego. Dodatkowo dość szczegółowo zostały opisane zastosowane urządzenia pomiarowe do pomiaru temperatury okładzin ciernych, a mianowicie termopary, pirometr i kamera termowizyjna. Przedstawiono również sposoby rejestracji wyników badań, obróbkę danych i graficzną ich prezentację. W sumie rozdział ten zawiera 15 stron rozprawy.

Rozdział 6 pt.: „Wyniki badań”, zapisany na 42 stronach rozprawy przedstawia szczegółowy opis danych wejściowych oraz uzyskane wyniki w poszczególnych badaniach. Otrzymane wyniki przedstawiono na wykresach oraz w tabelach. Poszczególne przebiegi zarejestrowanych parametrów dość precyzyjnie skomentowano oraz wyciągnięto krótkie wnioski.

Rozdział 7 pt.: „Model teoretyczny” przedstawia sposoby tworzenia modeli teoretycznych. Opisano niezbędne zależności matematyczne, sposób opracowania modelu numerycznego z wykorzystaniem metody elementów skończonych oraz modelu matematycznego z wykorzystaniem metody przybliżania iteracyjnego, w wyniku czego wyznaczono równania cząstkowe przebiegu momentu hamowania i temperatury na powierzchni próbki materiału ciernego w funkcji czasu trwania procesu hamowania. Rozdział ten zawiera 25 stron.

Rozdział 8 pt.: „Porównanie modelu z wynikami” prezentuje graficzne porównanie przebiegów temperatury uzyskanych z pomocą modelu symulacyjnego wykorzystującego metodę elementów skończonych i z badań eksperymentalnych oraz przebiegów momentu hamowania i temperatury uzyskanych z pomocą modelu matematycznego oraz zarejestrowanych podczas badań. Wykazano dużą ich zbieżność, potwierdzając tym samym dużą jakość opracowanych modeli. Rozdział ten zawarto na 5-u stronach rozdziału.

Rozdział 9 pt.: „Błędy w badaniach i obliczeniach” zawiera - na 7-u stronach - dość precyzyjną analizę błędów, które mogły zostać popełnione podczas prowadzonych badań eksperymentalnych oraz podczas obliczeń matematycznych i symulacji komputerowej. Wyniki tej analizy zostały częściowo przedstawione w sposób graficzny na wykresie oraz liczbowo w tabelach.

Rozdział 10 i 11 stanowią podsumowanie i wnioski, których rozdzielenie uważam za niezbyt racjonalne. Samo podsumowanie zawarte na niecałych 2-ch stronach jest w dużej części streszczeniem zawartości pracy. Wnioski natomiast, zawarte na 3-ch stronach rozprawy, stanowią jej kwintesencję i wykazują dużą jakość prac wykonanych w ramach realizacji rozprawy.

Ostatecznie stwierdzam, że rozwiązanie postawionego zadania zostało przeprowadzone prawidłowo przez Autora, a przyjęte założenia i metody nie budzą zastrzeżeń.

5. Oryginalność rozprawy – samodzielny dorobek Autora

Oryginalnym osiągnięciem Autora jest samodzielne opracowanie i wykonanie:

- metodyk pomiaru podstawowych parametrów procesu hamowania w badaniach modelowych, a w szczególności pomiarów temperatury par ciernych z wykorzystaniem termopar, pirometru i kamery termowizyjnej;
- metodyki badań temperatury kompletnego, lotniczego zespołu hamulcowego z wykorzystaniem pirometru;
- symulacyjnego modelu numerycznego z wykorzystaniem metody elementów skończonych;
- modelu matematycznego wykorzystującego metodę przybliżeń iteracyjnych do wyznaczenia przebiegów momentu hamowania i temperatury na powierzchni próbki materiału ciernego w funkcji czasu trwania procesu hamowania;
- analizy błędów pomiarów i obliczeń.

Równie dużym i bardzo oryginalnym osiągnięciem jest umiejętne przeprowadzenie dogłębnej analizy występujących, nagłych wahań momentu hamowania i powiązanie ich ze zmianami temperatury, która bezpośrednio oddziałuje na współczynnik tarcia (wzrost temperatury wywołuje spadek tego współczynnika).

Ponadto, dość oryginalnym jest sposób przeprowadzenia analizy literatury przedmiotu, wykazująca aktualny stan wiedzy na temat podjęty w rozprawie.

6. Uwagi ogólne

Sposób realizacji pracy nie budzi większych zastrzeżeń, jednak Autor nie ustrzegł się kilku istotnych błędów, do których należy zaliczyć:

- brak źródeł praktycznie na wszystkich zamieszczonych fotografiach, rysunkach oraz tabelach, szczególnie w odniesieniu, do których z góry jest wiadomo, że nie stanowią własności Doktoranta (np. rys. 1.1., 1.2, 1.3, 5.4, 5.5, 6.36, tabele 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 7.2). Ponadto, gdy dany rysunek, fotografia jest wykonana przez Doktoranta, wskazanym jest zapisanie źródła jako np. „opracowanie własne”;
- podawanie niepełnej listy współautorów publikacji (monografii), na które Doktorant się powołuje przy analizie literatury przedmiotu - wskazanym jest albo podawanie pełnej listy autorów, albo tylko odnośnik do pozycji w literaturze, co jest częściej praktykowane;
- na str. 29 – błędne odniesie do literatury: jest [14] a powinno być [13];
- na str. 35 – błędne odwołanie w tekście do pozycji na rys. 5.2, dotyczące siłownika hydraulicznego: ósmy wiersz od góry jest „5”, a powinno być „6”;
- brak naniesionych oznaczeń poszczególnych elementów na niektórych fotografiach, głównie dotyczących stanowisk badawczych, o których jest mowa przy opisach w tekście rozprawy – utrudnia to zrozumienie opisów działania itp., jak np. rys. 5.6, 5.7, 6.38;
- na str. 45 – zbędny opis badania układów ABS na stanowisku M3T, co nie jest przedmiotem badań w pracy (ostatnie dwa zdania od dołu);
- na str. 46 – zły podział wyrazu impulsowo-obrotowego (19 wiersz od dołu);
- na str. 53 – pomyłka w odwołaniu do rysunków przedstawiających wykresy z prób: 9 wiersz od dołu, jest 6.6-6.33, a powinno być 6.4-6.33;
- na str. 78 – użyto mało naukowego określenia dotyczącego najprawdopodobniej nadmiernego przyrostu temperatury, natomiast jest (21 wiersz od dołu) „... nadmierne nadbudowanie się temperatury...”;
- brak odniesień do pozycji literaturowych ogólnie znanych zależności, nie wyznaczonych przez Doktoranta, jak np.: zależność (7.1), (7.3);
- przy opisie zależności (7.6) występuje oznaczenie „k”, które wyjaśniono, że jest to prędkość zmiany wytrzymałości na ścinanie przy zmianie naprężeń normalnych – według mnie jest to współczynnik określający prędkość zmiany ww. wielkości, gdyż jest on bezwymiarowy, zaś prędkość jest zawsze określana w odpowiednich jednostkach;
- błędny opis składowych zależności (7.8) – w zależności występuje „ A_r ”, zaś w opisie poszczególnych składowych jest „ A_s ”. Ponadto występują zależności na obliczanie α i β (7.10), ale brak jest wyjaśnienia, co to za współczynniki oraz brak jest opisu składowych tych zależności;
- w tabeli 7.1 – użyto niezgodnego z układem SI opisu jednostki prędkości obrotowej i momentu hamowania. Jeżeli to wynika z potrzeb zastosowanego oprogramowania, to wskazanym jest naniesienie uwagi (wyjaśnienia) np. pod tabelą.

Ponadto jest wiele błędów natury czysto redakcyjnych, jak literówki, znaki interpunkcyjne itp., które zostały przekazane autorowi w trybie roboczym.

Stwierdzone błędy nie mają jednak wpływu na jakość pracy oraz jej stronę merytoryczną i nie umniejszają pozytywnego odbioru pracy.

7. Przydatność rozprawy w eksploatacji i poprawie bezpieczeństwa

Rozprawa doktorska mgr inż. Zbigniewa SKORUPKI stanowi ważny krok w rozpoznaniu zjawisk zachodzących z parach ciernych zespołów hamulcowych pojazdów naziemnych i statków powietrznych. Daje wymierne korzyści w zakresie zwiększenia skuteczności rozpoznawania nadmiernego zużywania się par ciernych układów hamulcowych w procesie ich eksploatacji, a także wpływa na wzrost bezpieczeństwa poprzez określenie korelacji pomiędzy zmianami temperatury (nagrzewania się) par ciernych, a zmianami momentu hamowania. Opracowane, autorskie metodyki i modele matematyczne są nowatorskie i stanowią skuteczne narzędzie do diagnozowania (monitorowania) układów hamulcowych.

8. Podsumowanie

Reasumując, uważam, że opiniowana rozprawa mgr inż. Zbigniewa SKORUPKI pt.: „WPŁYW TEMPERATURY TARCZY NA MOMENT HAMOWANIA CIERNEGO HAMULCA POJAZDU MECHANICZNEGO” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 Nr 65, poz. 595 z późn. zm.) i mieści się w dziedzinie budowa i eksploatacja maszyn.

W związku z tym wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Ponadto, uwzględniając obszar badań zrealizowany w rozprawie przez Doktoranta, sposób ich przeprowadzenia, analizy, tworzenie modeli matematycznych i symulacji numerycznej, wnioskuję o jej wyróżnienie.


.....