

Warszawa dn 10. 07.2020r.

Prof. dr hab. inż. Jerzy Bajkowski
Lotnicza Akademia Wojskowa
02-851 Dęblin
Ul. Dywizjony 303 Nr 35

RECENZJA

rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Piotra Mirosława Wasilewskiego

p.t.

BADANIA DOŚWIADCZALNE I MODELOWANIE NUMERYCZNE ROZKŁADU TEMPERATURY W UKŁADACH HAMULCOWYCH POJAZDÓW SZYNOWYCH

opracowana w związku z pismem WM-IIM.4130.1.20 z dn.17.06.2020r.
Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Wydziału Mechanicznego
Politechniki Białostockiej
prof. dr. hab. inż. Romualda Mosdorfa

1. Uwagi dotyczące tematu rozprawy, sformułowanego celu i tezy oraz zakresu pracy

Przedmiotem pracy są zagadnienia dotyczące modelowania, opisu matematycznego, analizy oraz badań eksperymentalnych parametrów temperaturowych różnych rodzajów roboczych materiałów i kształtów par ciernych, które tworzą współpracujące elementy hamulców kolejowych.

Naturalną koleją rozwoju nauki jest ciągła potrzeba znajdowania nowych pomysłów w konstruowaniu, kompozycji materiałów i wykonywanych z nich elementów pracujących urządzeń, a także poszukiwanie możliwości opisu ich właściwości w dążeniu do wyznaczenia optymalnych lub przynajmniej korzystniejszych od dotychczasowych, parametrów pracy. W przypadku hamulców, zwłaszcza mocno obciążanych cieplnie, szczególnego znaczenia nabierają wszelkie prace naukowe i naukowo-badawcze dotyczące opisu zjawisk zachodzących na powierzchniach elementów pary cierniej, które powodują zazwyczaj znaczący, nieustalony wzrost temperatury jak również powodowaną tym zjawiskiem zmianę właściwości ciernych hamulca. Dlatego uważam, że temat opiniowanej pracy doskonale wpisuje się w aktualny trend poszukiwań naukowych i naukowo-badawczych naukowców, inżynierów i eksploatorów tych urządzeń, gdyż dotyczy badań podstawowych zjawisk cieplnych zachodzących na powierzchniach par ciernych hamulców kolejowych, których rezultaty są uwiarygodnione rzetelnymi badaniami eksperymentalnymi, wykonanymi na rzeczywistych konstrukcjach współpracujących elementów ciernych. Potwierdzają one prawidłowość opracowanych modeli oraz zaproponowaną uszczegóławiającą obliczenia metodę określania nieustalonych stanów cieplnych par ciernych hamulców pojazdów szynowych i są doskonałą bazą danych z zakresu opisywanych zjawisk stając się przydatnym narzędziem do wykorzystania w projektowaniu i konstruowaniu tych urządzeń.

Zasygnalizowany tylko we wstępie, cel pracy został przez Doktoranta ściśle zdefiniowany i rozwinięty na końcu pierwszego rozdziału pracy. Jest nim „*określenie założeń do obliczeń numerycznych wykorzystujących MES i takiej metodyki ich prowadzenia, które pozwolą na prawidłowe oszacowanie pól temperatury powstających w wyniku nagrzewania tarcowego elementów ciernych hamulców stosowanych w pojazdach szynowych*”.

Autor założył, iż tak sformułowany cel pracy może zostać osiągnięty poprzez analizę konfrontującą wyniki badań „*wpływu założeń przyjmowanych w modelach numerycznych nagrzewania tarcowego hamulców*” z rezultatami przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Zdaniem Doktoranta takie działania pozwolą udowodnić tezę pracy, w której założono, iż „*Uwzględnienie w modelu numerycznym rzeczywistej, zależnej od warunków pracy, charakterystyki cierniej i właściwości cieplno-fizycznych materiałów elementów pary cierniej prowadzi do zwiększenia dokładności oszacowania niestacjonarnych pól temperatury tych elementów podczas hamowania pojazdu kolejowego*”.

To bardzo ambitne i trudne zadanie do zrealizowania. Przede wszystkim należy zdawać sobie sprawę z faktu, iż zjawiska cieplne jakie pojawiają się na powierzchniach par ciernych hamulców, zwłaszcza pojazdów szynowych ale także samochodowych, są od lat przedmiotem zainteresowania zarówno naukowców jak i inżynierów-pracowników branżowych, którzy są bardzo dobrze wyposażeni również w dobrą infrastrukturę badawczą.

Dlatego uważam, że Autor dysertacji bardzo starannie rozważył swoje możliwości badawcze, szczególnie w zakresie badań eksperymentalnych omawianych hamulców i mając dostęp do stanowiska badawczego w Instytucie Pojazdów Szynowych TABOR, do wyposażenia laboratoryjnego Instytutu Kolejnictwa w Warszawie, do laboratorium Zakładu Materiałów Wysokoenergetycznych na Wydziale Chemii Politechniki Warszawskiej oraz Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej (PB), mógł pokusić się o sformułowanie tak ambitnej tezy pracy, której udowodnienie będzie zasadniczym jej celem i jednocześnie znaczącym osiągnięciem naukowym.

Przewidywany zakres pracy Doktorant przedstawił zdawkowo we wstępie do pracy koncentrując się na zakresie zaplanowanych badań i rozwijając tekst, który dotyczy metod badawczych.

Takie przedstawienie zakresu pracy uznaję za słuszne, chociaż nie obejmuje ono całego zakresu pracy, zwłaszcza wskazania, że bazą zasadniczych badań były dwa, zupełnie nowe rodzaje materiałów (*oznaczenie X, Y*) i wytworzonych nowych elementów ciernych (*materiały A i B*). Mimo to, bardzo mi się podoba staranne i syntetyczne przedstawienie we wstępie do pracy, w przejrzystej formie, wszystkich zasadniczych działań, a w tym wyraźne wskazanie Autora co jest, w Jego opinii, nowością naukową pracy oraz jaki jest osobisty wkład w opracowane, w związku z realizacją doktoratu, publikacje oraz jakie jest znaczenie praktyczne rezultatów badań.

Ponieważ we wstępie do pracy, w zwięzłej formie Doktorant przedstawił jej strukturę oraz zamieścił starannie przygotowaną zwięzłą charakterystykę wszystkich jej rozdziałów, czuję się zwolniony od przedstawiania tego w innej formie i dlatego przechodzę do ogólnej oceny merytorycznej materiału zamieszczonego w kolejnych rozdziałach pracy.

2. Ocena merytoryczna materiału zawartego w rozprawie

Początkowa i znacząca część pierwszego rozdziału dysertacji, została poświęcona przeglądowi literatury związanej z dotychczasowymi metodami obliczeń temperatury elementów tworzących pary cierne hamulców kolejowych oraz na identyfikacji rezultatów wykonanych badań. Analiza ta dotyczyła zarówno hamulców klockowych jak i tarczowych.

Część druga rozdziału to literaturowy przegląd publikacji ilustrujących wpływ komponentów materiałowych jakie wykorzystywane są w konstrukcjach elementów tworzących pary cierne hamulców kolejowych, a także autorskie podsumowanie wskazujące, jakie rodzaje badań wytrzymałościowych materiałów uznaje się za niezbędne do oceny elementów ciernych przeznaczonych na hamulce, a więc pomiary twardości, wyznaczenie modułu sprężystości i gęstości materiału, zawartości substancji rozpuszczalnych w acetonie, a także badania wytrzymałościowe: na zginanie, ścinanie i ściskanie oraz badania udarności materiałów.

Kończącym podrozdziałem omawianej części rozprawy jest rozbudowany opis celu pracy (w zwartej formie został zaprezentowany we wstępie do pracy) obejmujący również metodykę zapewniającą gwarancję jego osiągnięcia.

Oceniając materiał zgromadzony w 1. rozdziale pracy stwierdzam, iż przegląd opracowań literaturowych został zrealizowany przez Doktoranta z wyjątkową starannością. Na pozytywną ocenę zasługuje przede wszystkim to, że w każdym z przywołanych przypadków opracowań, dokonana została analiza tych fragmentów, które ściśle są związane z tematem dysertacji, zarówno w zakresie metod obliczeń numerycznych hamulców jak i wpływu komponentów materiałowych na właściwości cierne hamulców. Zaprezentowane w podrozdziale 1.3 omawianego rozdziału 1. metody badań kolejowych materiałów ciernych przeznaczonych na konstrukcję hamulców, poza jednym wyjątkiem są badaniami standardowymi, które prowadzone są również dla innych rodzajów hamulców, np. samochodowych czy do maszyn roboczych. Dlatego uważam, że aż tak szczegółowy opis metod badania, np. ich twardości, mógłby być ograniczony do wskazania tylko specyficznych uwarunkowań, które przypisane są materiałom stosowanym na hamulce pojazdów szynowych i ujęte w odpowiednich obowiązujących dokumentach.

W drugim rozdziale dysertacji zaprezentowane zostały badania dwóch wersji materiałów ciernych. Pierwszy z nich to materiał stosowany do produkcji kompozytowych wstawek hamulcowych typu „K”, a drugi jest jego wersją zmodyfikowaną.

W pierwszej części rozdziału Autor skoncentrował się na opisie przygotowania materiałowych próbek badawczych, które w dalszej części występują pod nazwami „X” i „Y”. Ich szczegółowy skład materiałowy, co jest zrozumiałe, pozostaje tajemnicą firmy produkującej elementy hamulcowe. Przygotowane próbki poddane zostały szczegółowym badaniom wytrzymałościowym dzięki czemu znane są ich podstawowe właściwości fizykochemiczne. Kolejny etap badań dotyczący tych próbek obejmował klasyczne badania dynamometryczne, które wykonane zostały przy wykorzystaniu dynamometrycznego stanowiska badawczego przeznaczonego do badań hamulcowych wkładek samochodowych, (Doktorant ten rodzaj badań słusznie nazywa badaniami w zredukowanej skali), oraz stanowiska dynamometrycznego pozwalającego na badania rzeczywistych układów hamulcowych pojazdów szynowych. Otrzymane rezultaty badań, które zgodnie z tytułem rozdziału są „wstępnymi badaniami materiałowymi” zostały zaprezentowane w sposób kompletny zarówno w zakresie określenia właściwości mechanicznych i chemicznych, jak

I pełnych właściwości ciernych. Nie dziwię się więc, że wystarczyły one do opublikowania artykułu w dobrym wydawnictwie naukowym.

Trzeci rozdział pracy poświęcony został opisowi badań prototypowych elementów ciernych hamulców. Zasadnicze badania dotyczą dwóch rodzajów materiałów, które zostały nazwane „A” oraz „B”. Materiał oznaczony literą „A” to materiał, w którego składzie znajduje się od 25 ÷ 35% włókien szklanych, drugi materiał zawiera w swojej strukturze włókna stalowe, również w podobnej, tzn. 25 ÷ 35% ilości. Wykonane badania eksperymentalne dotyczyły: właściwości chemicznych, fizycznych, ciepłno-fizycznych i mechanicznych, a także wyznaczenia współczynników tarcia oraz charakterystyk ciernych obu materiałów. Pierwszą grupę badań wykonano w laboratorium na Wydziale Chemicznym Politechniki Warszawskiej. Badania właściwości ciernych wstawek, które przeprowadzono w skali zredukowanej na specjalistycznym stanowisku dynamometrycznym oraz na stanowisku, przystosowanym do badań rzeczywistych pełnowymiarowych kolejowych układów hamulcowych, jakim dysponuje Instytut Kolejnictwa w Warszawie. Zarówno program jak i harmonogram badań zostały przez Doktoranta precyzyjnie przemyślane i dopracowane. Są one zgodne z obowiązującymi procedurami badawczymi i przepisami jakie dotyczą badań kolejowych zestawów hamulcowych. Szczególną uwagę zwrócono na pomiary temperatury jaka występuje na powierzchniach pary ciernej. W tym celu w kole zostały zamocowane trzy termopary z których każda obejmowała inny zakres powierzchni koła. Zarejestrowane przez te czujniki wartości były zasadniczymi danymi, niezbędnymi do porównania wartości otrzymanych w badaniach eksperymentalnych i numerycznych, które zrealizowano w dalszej części pracy.

Rezultaty opisanych w tym rozdziale badań są bardzo interesujące. Zostały one zaprezentowane, opisane i przeanalizowane bardzo starannie stanowiąc doskonałą bazę wyjściową i porównawczą z wynikami badań numerycznych.

Kolejny rozdział rozprawy dotyczy w całości budowy modeli MES zastosowanych do tarcowego hamulca klockowego. Zagadnieniem głównym w określaniu temperatury hamowanego koła pojazdu szynowego jest znalezienie rozwiązania równania nieustalonego przewodnictwa ciepła (*równanie 4.1*), przy określonych warunkach początkowych (*4.2*) i brzegowych (*4.3*). Wyprowadzając macierz przewodności (*4.7*) i wektor kolumnowy gradientu temperatury (*4.8*) wyznaczyć można przybliżony rozkład temperatury wewnątrz analizowanego elementu (*4.14*), a wykorzystując, np. metodę Galerkiną, przybliżoną temperaturę w węzłach elementu (*4.15*). Uwzględniając twierdzenie Greena (*4.16*), po przekształceniach otrzymać można równanie różniczkowe zwyczajne opisujące temperaturę w interesującym węźle kolejnego elementu (*4.21*). Przyjmując w wyznaczonym równaniu funkcję kształtu dla kolejnych węzłów elementu skończonego otrzymuje się układ n równań w postaci (*4.28*), w którym odpowiednie składniki, w tym *macierze przewodności, pojemności cieplnej i pozostałe macierze oraz wektory kolumnowe określone są zależnościami (4.32 ÷ 4.38)*, a występujące w nim współczynniki macierzy i elementy wektorów kolumnowych wzorami (*4.24 ÷ 4.27 i 4.29*).

W dalszej części rozdziału Doktorant zaprezentował przyjęte modele geometryczne badanych struktur, przyjęte warunki brzegowe, warunki chłodzenia, właściwości ciepłno-fizyczne pary ciernej, a także parametry robocze analizowanych procesów hamowania.

Oceniam wysoko zarówno zaproponowane w wyżej opisanej formie rozwiązanie równania nieustalonego przewodnictwa ciepła, które w przedstawionej postaci jest ważnym wątkiem naukowym z zakresu badań podstawowych, jak również wszystkie działania Doktoranta dotyczące modelowania struktur analizowanych hamulców. .

W 5. rozdziale pracy zamieszczone zostały wyniki numerycznych obliczeń przebiegu zmian temperatury, które zostały zrealizowane zgodnie z zaplanowaną sekwencją przebiegu procesu hamowania. Za bardzo cenne uważam takie podejście Doktoranta do badań, które zaprezentowane zostało w 1. części rozdziału, gdzie dokonano porównania rezultatów obliczeń numerycznych struktury elementu 2xBgu z wcześniejszymi wynikami badań, które zostały wykonane na pełnowymiarowym stanowisku dynamometrycznym

Zadowolająca zgodność wyników obu rodzajów badań utwierdziła Doktoranta, iż Jego koncepcja badawcza jest poprawna i należy się spodziewać, że obliczenia kolejnych analizowanych wariantów omawianych struktur będą również poprawne.

Rezultaty obliczeń numerycznych dotyczące różnych sekwencji realizacji procesów hamowania dla dwóch rodzajów materiałów (A i B) wkładek zostały przedstawione, w drugiej i trzeciej części omawianego rozdziału. W jego końcowej części zaprezentowane zostały wyniki obliczeń numerycznych wyznaczonych pól temperatury dotyczące obu rzeczywistych elementów par ciernych hamulców.

Materiał zawarty w 6. rozdziale pracy zawiera podobne obliczenia numeryczne zmian temperatury ale dotyczące innej sekwencji realizacji procesu hamowania. W tym rozdziale prezentowane są rezultaty obliczeń w przypadku realizacji hamowania ciągłego. Wyniki badań zostały przedstawione w podobnej formie, jak w poprzednio omówionym rozdziale 5.

Oceniając materiał zawarty w obu omówionych ostatnio rozdziałach (5 i 6) należy z uznaniem podkreślić dużą staranność Doktoranta zarówno w zakresie prezentacji graficznej wyników, ale przede wszystkim w części, która obejmuje ich analizę. Została ona dokonana skrupulatnie i całościowo. Wyniki badań każdej ze zrealizowanej sekwencji hamowania były starannie analizowane jako oddzielna grupa interesujących rezultatów. Jednocześnie starano się formułować na tej podstawie wnioski syntetyzujące również dla każdego z dwóch badanych materiałów. Taki sposób analizy uważam za wyjątkowo poprawny gdyż obok szczegółowych stwierdzeń analitycznych zawiera również wnioski uogólniające.

3. Uwagi

a) dotyczące całej pracy

1. Praca jest przykładem bardzo dobrze zaplanowanych działań wyprzedzających opracowywanie dysertacji doktorskiej. Twierdzę tak na podstawie zamieszczonych informacji Autora, że zawarte w zaprezentowanym rozdziale rezultaty przeprowadzonych badań zostały wcześniej opublikowane (rozdział 1, 2, 3) w czasopismach naukowych. Zapewne dlatego w niektórych częściach pracy zasięg opracowań oraz prezentacja rezultatów badań jest znacznie szersza od niezbędnej do dalszej zasadniczej analizy problemu. Osobiście w pełni popieram takie działania chociaż wiem, że taka procedura realizacji dysertacji doktorskiej wymaga zarówno od Kandydata jak i Promotora doskonałego rozeznania w formułowaniu pośrednich zagadnień i celów naukowych, których zsumowane rozwiązanie określi w wystarczającym stopniu finalny cel dysertacji.
2. Pewnym zaskoczeniem w ocenianej pracy było również to, że mimo iż Autor, w początkowych rozdziałach zajmuje się również hamulcami tarczowymi to zasadnicza

analiza MES dokonana została tylko na przykładzie pary ciernej z klasyczną wkładką hamulcową. Zdaję sobie sprawę dlaczego tak się stało. Chcąc zrealizować podobny program badawczy należałoby powtórzyć cały cykl badań zupełnie innego zestawu kołowego z tarczą na osi i innymi klockami hamulcowymi.

3. W tym kontekście podziwiam Doktoranta za zaangażowanie w realizację czasochłonnych, żmudnych i kosztownych badań eksperymentalnych, które udało mu się zrealizować w czterech ośrodkach naukowo badawczych i w trzech różnych miastach.
4. Ocena zaprezentowanego opracowania graficznego pracy znacznie odbiega od wysokiej oceny merytorycznej materiału w niej prezentowanego. W dysertacji Autor preferuje, tzw. numerację cyfrową wielorzędową rozdziałów. W takich przypadkach aktualnym standardem jest, że np. po tytule rozdziału 1. powinien następować tytuł podrozdziału 1.1. , a zaraz po tytule podrozdziału 1.5. tytuł podrozdziału 1.5.1. itd.; pomiędzy nimi nie należy zamieszczać żadnych tzw. „tekstów wiszących”. Takie teksty to najczęściej ogólne wprowadzenie do rozdziałów, omówienia czy streszczenia. Jeśli „tekst wiszący” jest cennym i niezbędnym wprowadzeniem do tematu, powinien mieć numer i tytuł; gdy zawiera ogólniki lub omówienie dalszej części rozdziału powinien być usunięty przez autora.
5. W układzie graficznym pracy, w jej niektórych rozdziałach zwraca uwagę różnorodna objętość rozdziałów i podrozdziałów. W niektórych przypadkach tytuł podrozdziału zajmuje niewiele mniej miejsca niż umieszczony w nim tekst, np. kolejne podrozdziały w podrozdziale 1.3.
6. Innym wskazaniem jest również dążenie do tego aby rozdziały miały podobną wielkość.

b) uwagi szczegółowe

1. Mimo usilnych poszukiwań nie znalazłem wzmianki o tym, w jakim ośrodku znajduje się stanowisko dynamometryczne na którym zrealizowano badania próbek materiałowych w zredukowanej skali.
2. To urządzenie jest stanowiskiem dynamometrycznym, a nie jak Autor nazywa dynamometrem (*rys. 2.2 i inne miejsca w pracy*). Dynamometr jest jednym z urządzeń pomiarowych, które prawdopodobnie jest zamontowane na tym stanowisku (*choć może być tam zastosowana inna metoda pomiaru wartości momentu tarcia*)
3. W kilku tablicach nie zostały ujednolicone jednostki (*np. w tablicy 2.3 wymiary podawane są w mm, cm i inne*)
4. Trzeci rozdział bym zatytułował; „*Wytworzenie i badania prototypów materiałowych*” , a w tytułach rozdziałów 5. i 6. dodałbym, po słowie „*przebiegu*” słowo „*zmian*”.
5. Mam pewne wątpliwości, które dotyczą przywoływanej przez Doktoranta kilkakrotnie dokładności użytych termopar (*poproszę o wyrażenie opinii podczas obrony pracy*).

4. Podsumowanie rozprawy i wnioski końcowe

Oceniając całość zaprezentowanej rozprawy należy podkreślić istotną wagę poznawczą, badawczą i techniczną, analizowanych w pracy zagadnień mających na celu rozwiązanie

istotnego zadania naukowego. Realizacja kolejnych jej etapów potwierdziła poprawność przyjętej metodyki postępowania zmierzającej do udowodnienia sformułowanej tezy pracy. Z naukowego punktu widzenia najważniejszy materiał został zgromadzony w rozdziałach 4., 5. i 6. rozprawy, a więc materiał, dotyczący modelowania i opisu matematycznego zjawisk zachodzących na powierzchniach ciernych hamulców kolejowych, w szczególności zjawisk dotyczących nieustalonych zmian temperatury. Zamieszczone w tych rozdziałach wyniki obliczeń numerycznych zostały w pełni uwiarygodnione rozbudowanymi badaniami eksperymentalnymi, które zostały zrealizowane, w większości przypadków, na zespołach hamulcowych rzeczywistej wielkości. Uzupełniły je badania materiałowe próbek, które ze względu na rodzaj stanowiska badawczego, musiały być zrealizowane w zredukowanej skali. W żadnym z prezentowanych przypadków nie znalazłem najmniejszego powodu by mieć jakiegokolwiek zastrzeżenia co do wiarygodności rezultatów tych badań. Rezultaty badań numerycznych zostały skonfrontowane z wynikami badań eksperymentalnych. W większości przypadków różnice pomiędzy nimi są niewielkie lub jeśli przyjmiemy ocenę inżynierską, są one nawet niezauważalne. Każdy z przypadków dla których występowały nieco większe różnice wartości został przez Doktoranta starannie przeanalizowany i przedyskutowany w sposób wyjaśniający powody takiego stanu.

W moim przekonaniu w opiniowanej pracy Doktorant w pełni udowodnił sformułowaną na wstępie jej tezę i osiągnął założony cel pracy, którym było: *„określenie założeń do obliczeń numerycznych wykorzystujących MES i takiej metodyki ich prowadzenia, które pozwolą na prawidłowe oszacowanie pól temperatury powstających w wyniku nagrzewania tarcowego elementów ciernych hamulców stosowanych w pojazdach szynowych”*. Udowodnił więc, że opracowana metodyka obliczeń numerycznych uwzględniająca w nich zmienność wartości współczynnika tarcia na powierzchniach par ciernych hamulców stosowanych w pojazdach szynowych, pozwala na uszczegółowienie i bardziej precyzyjne, niż miało to miejsce dotychczas, określenie rozkładu pól temperaturowych na powierzchniach trących.

Biorąc pod uwagę przedstawiony mi do zaopiniowania materiał, oryginalność rozwiązane w rozprawie, istotnego zagadnienia naukowego, a tym samym fakt potwierdzenia umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i badawczej uważam, że przedłożona rozprawa może służyć za podstawę do rozpatrzenia wniosku o nadanie Kandydatowi stopnia doktora nauk technicznych. Wobec spełnienia wszystkich wymogów Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym z dnia 14.03.2003 r. wraz ze zmianami z dnia 18.03.2005 roku, stawiam wniosek o dopuszczenie mgr. inż. Piotra Mirosława Wasilewskiego do publicznej obrony opiniowanej pracy jako pracy doktorskiej reprezentującej dyscyplinę Inżynieria Mechaniczna.

Niniejszą opinię przedkładam Panu prof. dr. hab. inż. Romualdowi Mosdorfowi Przewodniczącemu Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej, zleciennodawcy wykonania powyższej opinii.