

prof. dr hab. inż. Jerzy Małachowski
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa
Tel.: +48 261 839 140
E-mail: jerzy.malachowski@wat.edu.pl

Warszawa, 12.09.2020 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej

Badania doświadczalne i modelowanie numeryczne rozkładu temperatury

w układach hamulcowych pojazdów szynowych

autorstwa mgr. inż. Piotra Mirosława Wasilewskiego

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi pismo (sygn. WM-IIM.4130/20) Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej, prof. dr hab. inż. ROMUALDA MOSDORFA i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr. inż. PIOTRA MIROSLAWA WASILEWSKIEGO pt. *Badania doświadczalne i modelowanie numeryczne rozkładu temperatury w układach hamulcowych pojazdów szynowych*. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Michał Kuciej, a promotorem pomocniczym dr hab. inż. Piotr Grześ, prof. PB.

2. Omówienie pracy

Recenzowana praca została napisana łącznie na 269 stronach maszynopisu zawierającego 88 rysunków i 44 tabel. Dysertację wydano w formacie B5 i składa się ona z: wykazu ważniejszych oznaczeń, wstępu, 6 rozdziałów, podsumowania i wniosków końcowych, streszczenia w j. polskim i angielskim, wykazu literatury (141 pozycji literaturowych) i dodatku. Tytuły poszczególnych rozdziałów są następujące: (1) Wprowadzenie; (2) Wstępne badania materiałowe; (3) Wytworzenie prototypów i badania materiałowe; (4) Numeryczne modele 2D i 3D MES nagrzewania tarcowego dla hamulca klockowego; (5) Wyniki obliczeń przebiegu temperatury w trakcie sekwencji hamowań do zatrzymania z określonym czasem chłodzenia; (6) Wyniki obliczeń przebiegu temperatury dla długotrwałego cyklu hamowań i w trakcie hamowań ciągłych.

Celem przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej było opracowanie założeń do obliczeń numerycznych wykorzystujących Metodę Elementów Skończonych (MES) i takiego sposobu ich prowadzenia, które pozwoli na prawidłowe oszacowanie pól temperatury powstających w wyniku nagrzewania tarcowego elementów ciernych hamulców stosowanych w pojazdach szynowych. Autor za obiekt badań przyjął nieustalone pola temperatury elementów ciernych powstające w wyniku nagrzewania tarcowego w trakcie hamowania pojazdu kolejowego. Dla tak założonego celu pracy został skonstruowany zakres badań, który obejmował zbadanie właściwości ciernych kompozytowych wstawek hamulcowych i opracowanie założeń stosowanych w modelach numerycznych nagrzewania tarcowego poprzez: odwzorowanie kształtu geometrycznego pary ciernej, zdefiniowanie warunków brzegowych na płaszczyźnie roboczej oraz opracowanie profilu czasowego intensywności tarcowej strumienia ciepła w trakcie hamowania.

Przyjęte przez Doktoranta metoda badań składała się z następujących etapów: wytworzenie prototypowych kompozytowych wstawek hamulca klockowego i przeprowadzenie badania właściwości mechanicznych, cieplno-fizycznych oraz określenie ich właściwości ciernych poprzez badania na pełnowymiarowym stanowisku dynamometrycznym do badania hamulców kolejowych; zastosowanie MES do wyznaczenia niestacjonarnych pól temperatury w czasie sekwencji hamowań do zatrzymania oraz hamowań ciągłych adaptując opracowane modele numeryczne różniące się w zakresie odwzorowania kształtu geometrycznego pary ciernej (uproszczone i zbliżone do rzeczywistego) wraz z warunkami brzegowymi zdefiniowanymi na płaszczyźnie roboczej dla stałych i zmiennych wartości współczynnika tarcia w trakcie hamowania i porównania wyników obliczeń numerycznych z pomiarami przeprowadzonymi podczas badań eksperymentalnych.

Doktorant zdefiniował także tezę pracy, która brzmiała: uwzględnienie w modelu numerycznym rzeczywistej, zależnej od warunków pracy, charakterystyki ciernej i właściwości cieplno-fizycznych materiałów elementów pary ciernej, co prowadzi do zwiększenia dokładności oszacowania niestacjonarnych pól temperatury tych elementów podczas hamowania pojazdu kolejowego. Niniejsza teza nie budzi wątpliwości i trafnie odzwierciedla analizowane zagadnienie badawcze.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy bardzo kluczowej kwestii, a mianowicie procesu projektowania układu hamulcowego pojazdu kolejowego poprzez określenie warunków roboczych pary ciernej, w szczególności temperatury, jakiej poddane mogą być jej elementy, przy zakładanych warunkach eksploatacji pojazdu. Temperatura pracy w sposób zasadniczy wpływa na dobór zastosowanych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych. Zaimplementowanie metod numerycznych w przedmiotowym zagadnieniu

stanowi alternatywę dla czasochłonnych i kosztownych badań laboratoryjnych dając możliwość oszacowania rozkładów temperatury poprzez modelowanie procesu nagrzewania tarcowego elementów ciernych hamulca. Analiza opublikowanej literatury przez Autora wskazała na możliwość udoskonalenia istniejących modeli numerycznych dzięki bardziej precyzyjnemu uwzględnieniu charakterystyki pary cieiernej, w dużej mierze zależnej od wartości współczynnika tarcia.

Doktorant na wstępie swoich badań dokonał analizy wpływu zmiany składu kompozytowego materiału ciernego stosowanego do produkcji wstawek kolejowego hamulca klockowego na jego właściwości. W zaproponowanych badaniach określił właściwości materiałowe oraz wyznaczył charakterystyki cieierne w drodze pomiarów na pełnowymiarowym stanowisku dynamometrycznym do badania par ciernych hamulców kolejowych (wyposażonym w elementy cieierne w ich naturalnym rozmiarze). W kolejnym kroku wyprodukowane zostały dwa materiały cieierne, które zawierały różne rodzaje włókien: szklane i stalowe, a których wybór Autor uzasadnił jedynie znaczącą różnicą ich właściwości cieierno-fizycznych i tribologicznych. Pozwoliło to Doktorantowi uzyskać zróżnicowane właściwości cieierne wytworzonych wstawek hamulcowych, które następnie poddano badaniom laboratoryjnym. Prototypy Autor zbadał na pełnowymiarowym stanowisku dynamometrycznym w celu określenia ich charakterystyk ciernych oraz uzyskania danych pomiarowych niezbędnych do stworzenia i walidacji modeli numerycznych nagrzewania tarcowego oraz otrzymanych wyników z przeprowadzonych badań symulacyjnych. W kolejnym numerycznym etapie badań opracowane zostały cztery modele z wykorzystaniem MES służące do przeprowadzenia obliczeń nieustalonych pól temperatury generowanych w elementach ciernych w trakcie hamowania pojazdu kolejowego. Modele numeryczne różniły się zarówno w zakresie odwzorowania kształtu geometrycznego pary cieiernej (uproszczone i zbliżone do rzeczywistego) oraz warunków brzegowych zdefiniowanych na płaszczyźnie roboczej: idealny kontakt cieierny, rozdział tarcowego strumienia ciepła określony empirycznym wzorem, a także warunki brzegowe w ogólnej postaci Barbera (zagadnienie termosprężystego kontaktu dla nieregularnych powierzchni). Obliczenia przeprowadzono zostały dla sekwencji hamowań do zatrzymania oraz hamowań ciągłych, dla części z nich definiując zarówno stałą, jak i zmienną w trakcie hamowania wartość współczynnika tarcia. W ostatnim etapie pracy dane uzyskane w trakcie badania doświadczalnego, tj. chwilowy współczynnik tarcia oraz zmierzone profile czasowe temperatury pod powierzchnią toczną koła, Doktorant wykorzystał do walidacji opracowanych modeli numerycznych nagrzewania tarcowego kolejowego hamulca klockowego. Porównaniu poddano oszacowane wartości temperatury średniej pod powierzchnią toczną koła, określone

na podstawie wartości temperatury obliczonej w punktach odpowiadających położeniu termopar w badaniu doświadczalnym. Analiza wyników obliczeń przeprowadzonych przez Doktoranta wykazała, że zastosowanie dowolnego z czterech opracowanych modeli numerycznych prowadzi do uzyskania zbliżonych wyników przebiegów temperatury pod powierzchnią toczną koła. Otrzymane wyniki analiz numerycznych cechowała ogólnie dobra zgodność z danymi doświadczalnymi. Autor dysertacji zauważył, że obliczenia numeryczne wykonane przy zmiennej wartości współczynnika tarcia, charakteryzowała nieznacznie lepsza zgodność w odniesieniu do zmierzonych wartości temperatury, niż w przypadkach, gdy wartość ta była przyjęta jako stała i określona oddzielnie dla każdego hamowania. Analizując otrzymane wyniki Doktorant wykazał, że wybór warunków brzegowych dotyczących sposobu określenia rozdziału intensywności tarciowego strumienia ciepła nie miał istotnego wpływu na wyznaczone wartości temperatury pod powierzchnią toczną koła, ale miał kluczowe znaczenie dla obliczonych wartości temperatury na powierzchni kontaktu wstawki hamulcowe - koło oraz temperatury wstawek hamulcowych. Doktorant poprzez porównanie z danymi doświadczalnymi wykazał także, że zaproponowane modele numeryczne mogą zostać zastosowane jako narzędzie wspomagające prace inżynierskie służące określeniu temperatury elementów ciernych kolejowego hamulca klockowego także dla przypadków długotrwałych procesów hamowania.

Mgr inż. Piotr Wasilewski może poszczycić się autorstwem/współautorstwem 5 publikacji opublikowanych w czasopismach z listy JCR (m.in. *Archives of Computational Methods in Engineering, Theoretical and Applied Mechanics Letters, Wear i International Communications in Heat and Mass Transfer*) charakteryzujących się wysokim współczynnikiem wpływu. Dorobek publikacyjny w sposób wyróżniający spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez stosowną ustawę. Dane bibliometryczne Doktoranta wg bazy SCOPUS (łącznie 11 publikacji, 50 cytowań i IH=4) także są godne podkreślenia i wyróżnienia.

Na podkreślenie zasługuje także fakt, że zaprezentowane w dysertacji wyniki badawcze to efekt udziału Autora rozprawy w następujących projektach badawczych: praca własna pt. „*Model numeryczny nagrzewania tarciowego pary ciernej koło kolejowe - wstawka hamulca klockowego i jego weryfikacja poprzez badania doświadczalne*” (nr MB/WM/20/2016); praca własna „*Weryfikacja modelu nagrzewania tarciowego kolejowego hamulca klockowego poprzez badania eksperymentalne*” (nr MB/WM/16/2018) oraz projekt z NCN nr 2017/27/B/ST8/01249 pt. „*Nieliniowe modele matematyczne i badania doświadczalne nagrzewania tarciowego kolejowego układu hamulcowego*”.

3. Uwagi, pytania merytoryczne oraz dyskusyjne

Po zapoznaniu się z treścią całej rozprawy, Recenzent chciałby otrzymać odpowiedzi/wyjaśnienia na następujące kwestie oraz wyraża swoje następujące wątpliwości natury merytorycznej:

- 1) W opracowanym przeglądzie literatury (mimo bardzo szeroko dyskutowanej tematyki), Recenzent nie znalazł publikacji uwzględniających badania wysokoenergetycznych układów hamulcowych np. stosowanych w wielotarczowych układach hamulcowych statków powietrznych wraz z metodologią ich badań, w których to stosuje się także badania termowizyjne (rejestracja lokalnych pól temperaturowych o wartościach przekraczających nawet 1300^o C) połączone z jednoczesną rejestracją silnie dynamicznych charakterystyk opisujących działanie okładzin ciernych wraz z procesem ich zużycia. W przeglądzie Recenzentowi brakuje także prac, które jednocześnie w sposób eksperymentalny i numeryczny podejmują zagadnienie procesu degradacji struktury powierzchniowej okładzin ciernych, a szczególnie etapowości tego procesu i skutków zarówno na wartości cierne, jak też termiczne.
- 2) Autor w sposób bardzo skrótowy potraktował prezentację problematyki badań materiałowych kompozytów stosowanych na okładziny cierne, nie definiując szczegółowo kryteriów ich doboru. Zaprezentowane właściwości cieplno-fizyczne w Tab. 3.6 dotyczą zakresu temperatur służących wyznaczeniu współczynnika przewodzenia (odpowiednio dla 30 i 100^oC), których wartość w późniejszych badaniach była znacznie przekraczana. Czym Autor tłumaczy takie podejście (uproszczenie) i na ile mogło takie założenie (uproszczenie) wpłynąć na wyniki dalszych badań symulacyjnych? Za celowe Recenzent uznaje potrzebę zaprezentowania wyników szczegółowych z badań materiałowych w dodatku do pracy. Z pewnością byłby to bardzo cenny element rozprawy dający możliwość sprawdzenia wykorzystania badanych kompozytów także w innych zastosowaniach.
- 3) W badaniach na stanowisku dynamometrycznym brak jest prezentacji zużycia wstawek w postaci np. zmian profilu chropowatości, analiz mikrostrukturalnych, itp. Zaprezentowano jedynie zużycie względne. Czy w przeprowadzonych badaniach wstawek hamulcowych uwidoczniły się efekty lokalnych nieregularności?
- 4) W opisach badań numerycznych Autor stosował 2D i 3D modele numeryczne. Brak jest jednak szczegółów prezentujących sposób rozwiązania zagadnienia od strony numerycznej (matematycznej). Opis w tym obszarze jest bardzo szczątkowy. Brak jest

także prezentacji użytych modeli konstytutywnych dla modelowanych kompozytowych wkładek hamulcowych oraz zaimplementowanego modelu kontaktu (w literaturze znanych jest kilkanaście różnych modeli opisu zagadnienia kontaktu ciał). Czy i jaki model homogenizacji przyjęto przy opisie właściwości termomechanicznych materiałów stosowanych na wkładki?

- 5) W jaki inny sposób niż poprzez zmianę warunków brzegowych realizowano opis numeryczny sekwencji hamowania? Czy cykliczność tych zmian nagrzewanie/chłodzenie mogła wpłynąć na właściwości cieplno-fizyczne i mechaniczne kompozytowych materiałów wkładek i w jaki sposób ten fakt uwzględniono w badaniach modelowych?
- 6) Czy wprowadzając współczynnik rozdziału intensywności tarciowego strumienia ciepła wg. wzoru Charrona i zakładając kontakt niedoskonały Autor powiązał jego wartość ze zmianą profilu styku (modelowanej geometrii powierzchni współpracy) w ujęciu numerycznym? Jaki profil rozkładu ciśnienia i jego wartość maksymalna zmieniała się w przypadku analiz dla tzw. kontaktu niedoskonałego? Jaka była metodologia korelacji tych parametrów?
- 7) Autor w badaniach stosował sposób walidacji analiz numerycznych w oparciu o pomiary uzyskane z termopar. Czy wprowadzenie lokalnych zmian geometrii (imperfekcji geometrycznej w postaci lokalnego karbu) i lokalnych zmian warunków brzegowych było odzwierciedlone w badaniach numerycznych? Jak wyglądała metodologia porównania wyników i sposób ich odczytu?
- 8) W niniejszej dysertacji Recenzent nie znalazł modelu prezentującego bilans energetyczny badanego układu. Dla tego typu zagadnień, jak zaprezentowane w pracy (dynamiczne zagadnienie termomechaniczne), badania bilansu należy uznać za kluczowe i uwiarygadniające ujęcie modelowe.
- 9) Jakie powinny być założenia i jak zbudowany winien być algorytm rozwiązania rozważanego w dysertacji zagadnienia w pełnym dwustronnym sprzężeniu termomechanicznym realizowanym dla opisu przypadku interakcji dynamicznej pomiędzy kołem a wkładką? Jakie kryteria/modele winny być zaimplementowane by móc realizować proces numerycznej degradacji stykających się powierzchni?
- 10) Jedną z kluczowych kwestii, która winna znaleźć swoje odzwierciedlenie w kolejnych badaniach, szczególnie analityczno-numerycznych, jest problematyka przewodnictwa ciepła w strukturze zaimplementowanych kompozytów wraz z odniesieniem się do poziomu ich modelowego opisu (mikro-, mezo- czy makroskopowe) oraz wyboru sposobu homogenizacji z uwzględnieniem efektów

lepkościowych, które generowane są w materiale na skutek oddziaływań dynamicznych wywołanych obciążeniem zewnętrznym.

Zamieszczone powyżej uwagi mają charakter bardziej dyskusyjny i inspirujący Doktoranta do przemyśleń w kierunku kolejnych etapów rozwijania zaprezentowanej metodologii badawczej i w żaden sposób nie umniejszają wysokiej wartości niniejszej rozprawy.

4. Ocena końcowa przedłożonej rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska charakteryzuje się ważnym aspektem naukowym i poznawczym oraz dużym potencjałem użytecznym. Autor rozprawy bez wątplenia wykazał potrzebę prowadzenia badań w przedstawionej w dysertacji tematyce. Omawianą rozprawę cechują także możliwości aplikacyjne na etapie inżynierskiego projektowania układów hamulcowych w warunkach przemysłowych. Zainteresowania te wynikają z praktyki przemysłowej, którą Doktorant realizuje pracując w firmie SMiOC FRENOPLAST Bulhak i Ciesławski S.A.

Na wartość naukową rozprawy składają się następujące oryginalne elementy, w tym także wnioski badawcze, które są zarazem w opinii Recenzenta, pewnego rodzaju osiągnięciami autorskimi tejże rozprawy doktorskiej:

- 1) Oryginalna i wieloaspektowa analiza literaturowa, która posłużyła Doktorantowi m.in. do powstania autorskiej publikacji w czasopiśmie *Archives of Computational Methods in Engineering* (IF= 6.730).
- 2) Uwzględnienie w modelach numerycznych profili czasowych intensywności tarcowego strumienia ciepła odwzorowujących rzeczywiste charakterystyki elementów ciernych hamulca kolejowego.
- 3) Zaproponowanie modeli numerycznych (dwu- i trójwymiarowych) z różnymi warunkami brzegowymi na powierzchni kontaktu.
- 4) Opracowanie modeli numerycznych pozwalających na symulację długotrwałych procesów hamowania.
- 5) Opracowanie wieloetapowej metody weryfikacji i walidacji wyników analiz numerycznych poprzez: zaplanowanie i przeprowadzenie kompleksowych badań doświadczalnych prototypowych elementów ciernych o zróżnicowanych właściwościach materiałowych oraz wykonanie pomiarów temperatury podczas hamowań w szerokim zakresie warunków roboczych; przyjęcie w modelach numerycznych założeń adekwatnych do rozpatrywanego zagadnienia (nagrzewania

tarciowego kolejowego hamulca klockowego); prawidłowego doboru parametrów zaproponowanych modeli MES badanej struktury i wykonanie analiz porównawczych wyników numerycznych z danymi uzyskanymi w toku przeprowadzonych badań doświadczalnych.

6) Opracowanie unikatowych dla przeprowadzonych badań wniosków końcowych.

Dodatkowym walorem tejże rozprawy jest zdobycie przez Doktoranta szeregu nowych umiejętności w zakresie zaprojektowania bardzo szerokiego zakresu badań eksperymentalnych i analiz numerycznych. Otrzymane i zaprezentowane wyniki, w opinii Recenzenta, stanowią cenny materiał naukowy dający możliwość także jego dalszej eksploracji i publikacji. Opracowane modele numeryczne powinny dać Doktorantowi asumpt do dalszych analiz, szczególnie w aspekcie rozwijania modelowania komputerowego i prowadzenia badań optymalizacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych w układach hamulcowych.

Rozprawa doktorska jest napisana pod kątem edycyjnym na niewątpliwe bardzo wysokim poziomie edycyjnym.

5. Wniosek końcowy

Recenzent stwierdza, że przedstawiona dysertacja doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę „*O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*” (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z dnia 14 marca 2003 roku, z późn. zm.) i stawia wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Mirosława Wasilewskiego.

Jednocześnie mając na względzie bardzo szeroki zakres zrealizowanych badań (numerycznych i eksperymentalnych), ich poziom naukowy poparty szerokim wachlarzem przeprowadzonych rozważań oraz unikatowość użytych metod i stanowisk badawczych, wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Białostockiej o wyróżnienie niniejszej rozprawy, której wyniki już znalazły swoje odzwierciedlenie w publikacjach Autora, które ukazały się w czasopismach z listy JCR (łącznie 5 takich prac).

