

Prof. dr hab. Yuriy Povstenko
Instytut Matematyki i Informatyki
Wydział Matematyczno-Przyrodniczy
Uniwersytet Humanistyczno-Przyrodniczy
im. Jana Długosza w Częstochowie
al. Armii Krajowej 13/15
42-200 Częstochowa
e-mail: j.povstenko@ujd.edu.pl

Częstochowa, dnia 28 sierpnia 2019 r.

RECENZJA

osiągnięcia naukowego dr. Piotra Grzesia pt. „Numeryczne modelowanie procesu generacji ciepła w hamulcach tarczowych z uwzględnieniem wzajemnego wpływu mocy tarcia, temperatury, wrażliwości termicznej materiałów i chłodzenia konwekcyjnego” w postępowaniu habilitacyjnym prowadzonym na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej oraz dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego Habilitanta

Przedmiotem recenzji jest osiągnięcie naukowe „Numeryczne modelowanie procesu generacji ciepła w hamulcach tarczowych z uwzględnieniem wzajemnego wpływu mocy tarcia, temperatury, wrażliwości termicznej materiałów i chłodzenia konwekcyjnego”. Podstawą opracowania recenzji jest pismo Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów do Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej Nr BCK-VI-L-7539/2019 z dnia 7 czerwca 2019 z informacją o powołaniu komisji habilitacyjnej w celu przeprowadzenia postępowania habilitacyjnego dr. Piotra Grzesia wszczętego w dniu 15 marca 2019 r., w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie mechanika.

I. Podstawa formalno-prawna recenzji

Recenzja została opracowana na podstawie zlecenia Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej zgodnie z wymaganiami Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (z późniejszymi zmianami) oraz Rozporządzenia MNiSW z dnia 1 września 2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego.

Opracowanie recenzji osiągnięcia naukowego oraz oceny dorobku naukowego, organizacyjnego i dydaktycznego dr. Piotra Grzesia zostało dokonane na podstawie dostarczonych dokumentów formalnych:

1. Pismo Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów do Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej Nr BCK-VI-L-7539/2019 z dnia 7 czerwca 2019 r. z informacją o powołaniu mnie na recenzenta w przewodzie habilitacyjnym dr. Piotra Grzesia.

2. Pismo Prodziekana Wydziału Mechanicznego ds. Nauki Politechniki Białostockiej Małgorzaty Grądzkiej-Dahlke Nr WM-400.4140.18.2018 z dnia 24 lipca 2019 r. wystosowane w związku z decyzją Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów powołującą mnie na recenzenta w przewodzie habilitacyjnym dr. Piotra Grzesia.
3. Wniosek Habilitanta.
4. Informacja o przebiegu pierwszego postępowania habilitacyjnego.
5. Kopia pisma Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów informującego o powołaniu komisji habilitacyjnej w pierwszym postępowaniu habilitacyjnym.
6. Poświadczona kopia dokumentu stwierdzającego posiadanie stopnia doktora.
7. Autoreferat w języku polskim i angielskim.
8. Wykaz osiągnięć naukowo-badawczych Habilitanta w języku polskim i angielskim.
9. Wykaz dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego oraz współpracy międzynarodowej Habilitanta w języku polskim i angielskim.
10. Oświadczenia współautorów publikacji.
11. Dane kontaktowe.
12. Kopie artykułów stanowiących jednotematyczny cykl publikacji, wskazanych w autoreferacie jako osiągnięcie naukowe.
13. Wersja elektroniczna przesłanych dokumentów na nośniku CD.
14. Monografia pt. „Sprzężone modele numeryczne generacji ciepła w hamulcach tarczowych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, 2019.

II. Charakterystyka sylwetki zawodowej Kandydata

Dr Piotr Grześ w 2009 roku ukończył z wyróżnieniem wyższe studia magisterskie na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej na kierunku mechanika i budowa maszyn, specjalność mechanika i informatyka stosowana. W latach 2010 – 2013 był doktorantem w Katedrze Mechaniki i Informatyki Stosowanej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej. W roku 2013 po obronie pracy doktorskiej „Numeryczne modelowanie procesu nagrzewania tarcowego w układzie tribologicznym nakładka-tarcza z wykorzystaniem metody elementów skończonych” uzyskał z wyróżnieniem stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej mechanika ze specjalności metody komputerowe mechaniki (promotor pracy doktorskiej – prof. dr hab. O. Jewtuszenko, recenzenci – prof. dr hab. inż. T. Burczyński oraz dr. hab. inż. A. Kazberuk). Praca była obroniona na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej. Od października 2013 r. dr Piotr Grześ jest adiunktem w macierzystej jednostce i na tym stanowisku jest zatrudniony do chwili obecnej.

III. Ocena osiągnięcia naukowego Habilitanta

Przedstawione przez Kandydata osiągnięcie naukowe „Numeryczne modelowanie procesu generacji ciepła w hamulcach tarczowych z uwzględnieniem wzajemnego wpływu mocy tarcia, temperatury, wrażliwości termicznej materiałów i chłodzenia konwekcyjnego” (zgodnie z art. 16 ust. 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r.) będące podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie mechanika stanowi zbiór 8 jednotematycznych publikacji

(3 samodzielnych i 5 we współautorstwie) w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports oraz monografia naukowa „Sprężone modele numeryczne generacji ciepła w hamulcach tarczowych” opublikowana w 2019 r. w Oficynie Wydawniczej Politechniki Białostockiej i podsumowująca badania Habilitanta. Omówię poszczególne publikację Kandydata stanowiące osiągnięcie naukowe.

- 1) **A.A. Yevtushenko, P. Grześ (2014). Mutual influence of the velocity and temperature in the axisymmetric FE model of a disc brake. International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 57, pp. 341–346; IF 2014: 2.782; 35 punktów według Części A Wykazu czasopism naukowych MNiSW (P. Grześ – udział 50%)**

W artykule zaproponowano osiowosymetryczny model skończonych elementów dla analizy pola temperatury i tarcia w hamulcu z uwzględnieniem wzajemnego wpływu temperatury i prędkości pojazdu. Taki wpływ opisuje się za pomocą współczynnika tarcia. Zbadano wpływ stałego i zależnego od temperatury współczynnika tarcia na maksymalną temperaturę, czas hamowania, drogę hamowania i zużycie powierzchni tarcia hamulca. Zależność współczynnika tarcia od temperatury była uwzględniona na podstawie znanych danych eksperymentalnych (współczynnik tarcia zwiększa się monotonicznie, osiąga maksymalną wartość przy temperaturze 200°C oraz zmniejsza się przy zmianie temperatury do 300°C). W modelu matematycznym zakłada się, że między hamulcem i dyskiem spełnione są warunki doskonałego kontaktu cieplnego (równość temperatur i strumieni ciepła), a na swobodnych powierzchniach odbywa się konwekcyjna wymiana ciepła ze środowiskiem.

- 2) **A.A. Yevtushenko, P. Grześ (2015). Effects of dimensions of pad and disk on the temperature and duration of braking. Journal of Friction and Wear, vol. 36, No.4, pp. 280–285; IF 2015: 0.400; 15 punktów według Części A Wykazu czasopism naukowych MNiSW (P. Grześ – udział 75%)**

Ten artykuł uogólnia wyniki poprzedniego artykułu poprzez analizę takich czynników jak rozmiar hamulca i dysku. Analizę przeprowadzono dla hamulca wykonanego z metaloceramiki, a dysku wykonanego z żelaza w przypadku współczynnika tarcia zależnego od temperatury. Zakłada się, że

- termofizyczne charakterystyki materiałów hamulca i dysku są stałe;
- rozkład siły tarcia po powierzchni układu hamulcowego jest jednorodny;
- masy hamulca i dysku pozostają stałe.

Przeprowadzono bardzo szczegółową analizę numeryczną. Ustalono, że rozmiar hamulca mało zmienia maksymalną temperaturę hamulca i gradient temperatury w hamulcu, ale ma znaczący wpływ na zmniejszenie czasu hamowania oraz drogi hamowania.

- 3) **A.A. Yevtushenko, P. Grześ (2015). 3D FE model of frictional heating and wear with a mutual influence of the sliding velocity and temperature in a disc brake. International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 62, pp. 37–44; IF 2015: 2.559; 45 punktów według Części A Wykazu czasopism naukowych MNiSW (P. Grześ – udział 50%)**

W artykule zaproponowano trójwymiarowy model skończonych elementów dla badania tarcia i zużycia w hamulcu z uwzględnieniem prędkości i temperatury tarcia. Ważną częścią składową zaproponowanego modelu jest uwzględnienie zależności współczynnika tarcia od temperatury w równaniu ruchu oraz wyznaczenie mocy tarcia w warunkach brzegowych dla równania przewodnictwa ciepła. Oprócz tego, zakłada się, że

- ciśnienie na powierzchniach kontaktu jest stałe;
- temperatura dysku jest symetryczna względem średniej powierzchni;
- zachodzą warunki doskonałego kontaktu cieplnego;
- współczynnik zużycia zależy od temperatury.

Ustalono, że zmianę czasu hamowania i drogi hamowania można w przybliżeniu oszacować jako proporcjonalne do zmian współczynnika tarcia. Natomiast przy obliczeniu maksymalnej temperatury wystarczy ograniczyć się stałym współczynnikiem tarcia.

- 4) **A.A. Yevtushenko, P. Grześ (2015). Maximum temperature in a three-disc thermally nonlinear braking system. International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 68, pp. 291–298; IF 2015: 2.559; 45 punktów według Części A Wykazu czasopism naukowych MNiSW (P. Grześ – udział 50%)**

Bardziej skomplikowany model hamulca rozważa się w kolejnym artykule. Układ hamulcowy składa się z dwóch stacjonarnych zewnętrznych dysków przyciśniętych do środkowego ruchomego dysku. Model zawiera nieliniowe równanie przewodnictwa ciepła z wykorzystaniem hipotezy Chichinadze. Sumaryczna siatka osiowosymetrycznych elementów skończonych modelu obliczeniowego hamulca zawiera 275 czworobocznych osiowosymetrycznych elementów (165 dla dysku stacjonarnego i 110 dla połowy grubości dysku ruchomego). Krok dyskretyzacji czasowej wybiera się automatycznie przez program komputerowy. Analiza numeryczna została przeprowadzona dla materiałów, które wykorzystuje się w systemach hamulcowych samolotów. Ustalono, że wrażliwość termiczna materiałów ma znaczący wpływ na maksymalną temperaturę w układzie hamulcowym. W ramach zaproponowanego modelu matematycznego dokonano porównania maksymalnej temperatury otrzymanej z rozwiązania analitycznego przy stałych termofizycznych charakterystykach materiału oraz maksymalnej temperatury otrzymanej przy rozwiązaniu nieliniowego osiowosymetrycznego równania przewodnictwa ciepła metodą elementów skończonych.

- 5) **A.A. Yevtushenko, P. Grześ (2016). Mutual influence of the sliding velocity and temperature in frictional heating of the thermally nonlinear disc brake. International Journal of Thermal Science, vol. 102, pp. 254–262; IF 2016: 3.615; 40 punktów według Części A Wykazu czasopism naukowych MNiSW (P. Grześ – udział 75%)**

W artykule zależność ciśnienia na powierzchni kontaktu układu hamulcowego od czasu modeluje się funkcją wykładniczą; nie tylko współczynnik tarcia, ale również

charakterystyki materiału zależą od temperatury. Trójwymiarowe równanie przewodnictwa ciepła w układzie walcowym z współczynnikami przewodzenia ciepła zależnymi od temperatury rozwiązuje się metodą skończonych elementów. W artykule opracowano skuteczny algorytm numeryczny rozwiązywania bardzo skomplikowanego zagadnienia. Oprócz programu COMSOL Multiphysics, był opracowany własny kod w wykorzystaniem języka C++. Było przetestowano kilka siatek metody elementów skończonych; ogółem wykorzystano 4668 elementów (720 elementów dla hamulca i 3948 elementów dla dysku); krok dyskretyzacji czasowej wynosi 0.002 s. Zależność czasowa ciśnienia na powierzchni kontaktu ma znaczący wpływ tak na czas hamowania, jak i na drogę hamowania. W artykule również przeprowadzono szczegółowe porównanie rozwiązań ze stałymi i zmiennymi charakterystykami materiału i współczynnikiem tarcia.

- 6) P. Grześ (2017). Determination of maximum temperature at single braking from the FE solution of heat dynamics of friction and wear system of equations. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, vol. 71, No. 7, pp. 737–753; IF 2017: 2.409; 30 punktów według Części A Wykazu czasopism naukowych MNiSW (P. Grześ – udział 100%)**

Kolejne trzy artykuły Habilitant opublikował samodzielnie, bez współautorów, ze 100% udziałem. Układ hamulcowy zbadany w wyżej wymienionym artykule składa się z trzech części – dwóch nieruchomych elementów oraz jednego obrotowego. Zaproponowany model matematyczny uwzględnia zależność termofizycznych charakterystyk materiału od temperatury oraz zależność współczynnika tarcia od temperatury. Taka zależność staje się bardzo ważna, kiedy nie tylko temperatura powierzchni hamulca osiąga dużych wartości, ale również temperatura wewnątrz składowych układu hamulcowego. Zagadnienie początkowe dla równania ruchu oraz początkowo-brzegowe zagadnienie dla równania przewodnictwa ciepła rozwiązano dla rozważanego układu hamulcowego. W artykule zbadano zmianę prędkości kątowej hamulca, zależność temperatury w dysku i hamulcu od czasu i zmiennych przestrzennych, ewolucję termomechanicznego zużycia na powierzchniach tarcia podczas hamowania.

- 7) P. Grześ (2018). Finite element solution of the three-dimensional system of equations of heat dynamics of friction and wear during single braking. Avances in Mechanical Engineering, vol. 10, No. 11, pp. 1–15; IF 2017: 0.848; 25 punktów według Części A Wykazu czasopism naukowych MNiSW (P. Grześ – udział 100%)**

W artykule zbadano termotribologiczny aspekt modelowania hamulca z uwzględnieniem zależności od temperatury twardości materiału oraz parametrów mikrogeometrii powierzchni hamulca. Nieliniowe równanie przewodnictwa ciepła rozważa się w przypadku trzech zmiennych przestrzennych i czasu ze współczynnikiem przewodzenia ciepła zależnym od temperatury. Uwzględnia się plastyczny mechanizm deformacji powierzchni hamulca oraz twardość według Brinella. Zmiana maksymalnej temperatury na powierzchni tarcia przedstawia się jako suma średniej temperatury na nominalnej powierzchni kontaktu oraz

temperatury błysku na realnej powierzchni kontaktu. Temperatura błysku ma znaczący wpływ na twardość materiału. Przeprowadzono bardzo szczegółową analizę numeryczną pola temperatury, prędkości i termomechanicznego zużycia dla trzech różnych materiałów, które wykorzystuje się w praktyce. Teoretyczne wyniki otrzymane w artykule są zgodne ze znanymi w literaturze danymi eksperymentalnymi.

- 8) P. Grześ (2019). **Maximum temperature of the disc during repeated braking applications. Avances in Mechanical Engineering**, vol. 11, No. 3, pp. 1–13; IF 2017: 0.848; 40 punktów według Wykazu czasopism naukowych MNiSW (P. Grześ – udział 100%)

Kolejnym ważnym elementem w badaniu zachowania układu hamulcowego jest uwzględnienie wzajemnego wpływu prędkości i maksymalnej temperatury w osiowosymetrycznym modelu skończonych elementów dla przypadku hamowania wielokrotnego. Obliczenia wykonano dla termofizycznych charakterystyk materiału zależnych od temperatury oraz dla ciśnienia na powierzchniach kontaktu zmiennego w czasie. Dla każdego okresu hamowania i następnego przyśpieszenia współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła ze środowiskiem przyjmuje uśrednioną stałą wartość. Uwzględniono rozmiary chropowatości powierzchni kontaktu (promień i wysokość chropowatości) oraz twardość powierzchni według Brinella. Zbadano zależność temperatury błysku od ilości hamowań. Wyniki otrzymane w artykule w ramach zaproponowanego modelu matematycznego są zgodne ze znanymi w literaturze danymi eksperymentalnymi.

- 9) P. Grześ (2019). **Sprężone modele numeryczne generacji ciepła w hamulcach tarczowych**, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok; recenzenci: prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński, czł. koresp. PAN oraz prof. dr hab. inż. Ewa Majchrzak (P. Grześ – udział 100%)

Monografia liczy 188 stron, w tym 20 tabel, 94 rysunki (tak czarnobiałe, jak kolorowe) oraz 10 stron spisu cytowanej literatury (101 pozycja). Do wszystkich pozycji literaturowych występują odwołania w tekście zasadniczym. Zarówno tekst jak i rysunki i tabele przygotowano starannie pod względem edytorskim, a monografia napisana została w sposób przejrzysty. Zastosowanie kolorowych rysunków ułatwia zrozumienie omawianych treści.

W rozdziale **pierwszym** monografii „Modelowanie procesu generacji ciepła w hamulcu tarczowym za pomocą programu COMSOL Multiphysics®” zmodelowano rozkład sił w układzie nakładka-tarcza-koło-podłoże oraz omówiono numeryczne rozwiązania liniowych osiowosymetrycznych (uśrednionych w kierunku obwodowym) i przestrzennych (trójwymiarowych) początkowo-brzegowych zagadnień dla równania przewodnictwa ciepła podczas hamowania. Sformułowany model zawiera współczynnik pokrycia, który pozwala na odzwierciedlenie rzeczywistego wymiaru obszaru kontaktu, oraz współczynnik rozdzielenia strumieni ciepła, który uwzględnia wpływ własności termofizycznych nakładki na temperaturę tarczy. Rozdział również

zawiera dokładny opis modułu Heat Transfer w programie COMSOL Multiphysics®. Podano zestawienie modułów dostępnych w programie COMSOL Multiphysics®, opisano okna ustawień w tym programie, zaprezentowano budowę modelu geometrycznego oraz siatki elementów skończonych osiowosymetrycznego i trójwymiarowego modelu tarczy hamulcowej, pokazano wizualizację przestrzenną pola temperatury w różne chwile czasu. Przedstawiony w tym rozdziale materiał stanowi wprowadzenie do bardziej zaawansowanych modeli procesu nagrzewania hamulców tarczowych rozważanych w następnych rozdziałach monografii.

W rozdziale **drugim** „Osiowosymetryczny 2D model hamulca tarczowego z uwzględnieniem wzajemnego wpływu temperatury i prędkości” opracowano osiowosymetryczny model do zbadania wpływu współczynnika tarcia na czas hamowania, maksymalną temperaturę powierzchni tarcia oraz na zmianę prędkości pojazdu. Wartość współczynnika tarcia zależy od prędkości, ciśnienia kontaktowego, temperatury i termofizycznych własności pary ciernej. Zależności współczynnika tarcia od temperatury i ciśnienia kontaktowego zaadaptowano z eksperymentów innych autorów. Dla równania ruchu rozwiązuje się zagadnienie początkowe, dla równania przewodnictwa ciepła rozwiązuje się zagadnienie początkowo-brzegowe. Sprzężenie obu zagadnień dokonuje się poprzez wprowadzenie współczynnika tarcia. Numeryczne rozwiązanie sformułowanych zagadnień otrzymano za pomocą metody elementów skończonych oraz iteracyjnego algorytmu powiązanego z dyskretyzacją przestrzennej nieliniowego układu równań różniczkowych. Pola temperatury nakładki i tarczy oraz czas hamowania porównuje się przy stałym i wrażliwym termicznie współczynniku tarcia. Rozpatrzono kilka wariantów wymiarów nakładki i tarczy przy zachowaniu ich stałych objętości i jednakowej pracy tarcia podczas hamowania.

W rozdziale **trzecim** „Uwzględnienie temperatury błysku przy wyznaczeniu temperatury maksymalnej w trójtarczowym nieliniowym termicznie układzie hamulcowym” rozpatrzono układ hamulcowy składający się z trzech tarcz o jednakowych wymiarach z materiału kompozytowego Termar-ADF. Opracowano model numeryczny do wyznaczenia temperatury maksymalnej wielotarczowego układu hamulcowego. Zaproponowany model uwzględnia wrażliwość termiczną materiału oraz parametry chropowatości powierzchni tarcia. Zgodnie z hipotezą Chichinadze, maksymalna temperatura na każdej powierzchni kontaktu przedstawia się w postaci sumy temperatury średniej tych powierzchni oraz temperatury błysku. Układ równań modelu matematycznego zawiera:

- doświadczalne zależności właściwości termofizycznych i twardości kompozytu Termar-ADF od temperatury;
- wzory do obliczenia liniowego zwiększenia ciśnienia kontaktowego przy zadanym czasie narastania;
- zagadnienie początkowe dla równania ruchu, rozwiązanie którego pozwala ustalić ewolucję prędkości obrotowej tarczy i czasu hamowania;
- nieliniowe osiowosymetryczne zagadnienie początkowo-brzegowe dla równania przewodnictwa ciepła pozwalające znaleźć temperaturę średnią;
- wzory analityczne do obliczenia temperatury błysku.

Na podstawie opracowanego modelu obliczeniowego wyznaczono temperaturę maksymalną dla układu hamulcowego, w którym wszystkie trzy tarcze wykonano z materiału ciernego wzmocnionego włóknami węglowymi Termar-ADF wykorzystywanego w wielotarczowych układach hamulcowych lotniczych. Temperaturę błysku obliczono za pomocą znanych rozwiązań analitycznych nieliniowego jednowymiarowego zagadnienia cieplnego tarcia z uwzględnieniem zależności twardości Brinella materiału od temperatury. Jednocześnie zaproponowano metodykę do oszacowania temperatury maksymalnej przy stałych właściwościach termofizycznych i twardości odpowiadających temperaturze objętościowej.

W rozdziale **czwartym** „Zastosowanie 2D układu równań cieplnej dynamiki tarcia i zużycia (CDTZ) do wyznaczenia temperatury maksymalnej w tarczowym układzie hamulcowym przy hamowaniu jednokrotnym” opracowano sprzężony układ równań dla hamulca tarczowego, w którym uwzględniono:

- eksponencjalną zmianę ciśnienia kontaktowego w czasie hamowania;
- doświadczalne zależności współczynników tarcia i intensywności zużycia masowego powierzchni kontaktu od temperatury;
- wrażliwość termiczną materiałów pary cierniej;
- doświadczalną zależność twardości materiału nakładki od temperatury;
- nieliniowe zagadnienie początkowe dla równania ruchu z siłą tarcia zależną od temperatury;
- osiowosymetryczne dwuwymiarowe zagadnienie początkowo-brzegowe dla równania przewodnictwa ciepła z nieliniowością zewnętrzną i wewnętrzną do wyznaczenia ewolucji temperatury średniej powierzchni kontaktu;
- model kontaktu plastycznego powierzchni chropowatej z powierzchnią gładką do wyznaczenia błysku temperaturowego;
- wzory do obliczenia termomechanicznego zużycia masowego powierzchni kontaktu nakładek z tarczą.

W modelu matematycznym zastosowano uzasadnione założenia upraszczające. Pomijano falistość powierzchni; zakładano, że chropowatości mają kształt sferycznych segmentów umieszczonych na powierzchni tarczy, powierzchnia nakładki jest gładka. Uważa się, że kontakt chropowatości z gładką powierzchnią jest plastyczny; poślizg pojedynczej chropowatości po gładkiej powierzchni trwa do momentu jej deformacji na skutek wzrostu temperatury i zrównania się twardości materiałów. Symulacje komputerowe przeprowadzono dla pary cierniej składającej się z metaloceramicznej nakładki i żeliwnej tarczy. Przeanalizowano wpływ temperatury średniej i temperatury błysku na czas hamowania, prędkość kątową i zużycie masowe, a także ich wzajemne relacje przy wyznaczeniu temperatury maksymalnej. Poprawność obliczeń została zweryfikowana przez spełnienie warunku równości całkowitej pracy tarcia we wszystkich rozpatrywanych wariantach obliczeniowych.

W rozdziale **piątym** „Przestrzenny 3D model hamulca tarczowego z uwzględnieniem wzajemnego wpływu temperatury i prędkości” opracowano trójwymiarowy sprzężony kontaktowy model obliczeniowy dla hamulca tarczowego pojazdu samochodowego z wykorzystaniem metody elementów skończonych do wyznaczenia zmian

temperatury, prędkości oraz termomechanicznego zużycia masowego powierzchni w procesie hamowania jednokrotnego. Model przestrzenny, w odróżnieniu od modelu osiowosymetrycznego, pozwolił na wyznaczenie bardziej realistycznego, oscylującego charakteru profilu czasowego temperatury w ustalonym punkcie obszaru kontaktu nakładki z tarczą, spowodowanego zmianą czasów nagrzewania i chłodzenia konwekcyjnego przy każdym obrocie koła pojazdu. Do obliczeń wykorzystano siatkę o liczbie 3678 elementów (576 dla nakładki i 3102 dla tarczy); krok czasowy dla tarczy wynosi 0.002 s, a dla nakładki 0.005 s. Analizę numeryczną przeprowadzono dla dwóch materiałów nakładki powiązanych z tą samą żeliwną tarczą.

W rozdziale **szóstym** „Przestrzenny 3D model obliczeniowy do wyznaczenia temperatury w nieliniowym termicznie hamulcu tarczowym” trójwymiarowy układ równań cieplnej dynamiki tarcia i zużycia został uzupełniony dwoma nowymi elementami. Zakłada się eksponencjalny wzrost ciśnienia kontaktowego od zera w chwili rozpoczęcia hamowania do wartości nominalnej, która następnie utrzymuje się do chwili zatrzymania pojazdu. W obliczeniach numerycznych również uwzględnia się wrażliwość termiczna materiałów nakładek i tarczy hamulcowej w procesie hamowania. Analityczne zależności współczynników tarcia, przewodzenia ciepła i ciepła właściwego od temperatury uzyskano za pomocą aproksymacji odpowiednich danych eksperymentalnych. Rozwiązanie numeryczne za pomocą metody elementów skończonych zagadnienia początkowego dla równania ruchu i nieliniowego trójwymiarowego zagadnienia przewodnictwa ciepła z uwzględnieniem generacji ciepła na skutek tarcia otrzymano według opracowanego schematu iteracyjnego. Głównym celem obliczeń było zbadanie interakcji pomiędzy prędkością pojazdu, zależnym od temperatury współczynnikiem tarcia, właściwościami termofizycznymi materiałów i zależnym od czasu naciskiem kontaktowym oraz ustalenie ich wpływu na kluczowe parametry procesu – czas i drogę hamowania oraz temperaturę maksymalną.

W rozdziale **siódmym** „Wpływ temperatury błysku na temperaturę maksymalną tarczowego układu hamulcowego – nieliniowy model 3D” opracowano sprzężony model numeryczny trójwymiarowego układu hamulcowego nakładka-tarcza do wyznaczenia temperatury maksymalnej. Założenie o doskonałym kontakcie cieplnym jest uzasadnione przy idealnie gładkich powierzchniach kontaktu. Rzeczywisty kontakt zachodzi w wierzchołkach oddzielnych chropowatości i prowadzi do powstania temperatury błysku. Przeprowadzono porównanie wartości temperatury maksymalnej wyznaczonej za pomocą dwóch podejść do wyznaczenia temperatury błysku. W pierwszym podejściu obliczenia temperatury błysku były oparte na zaczerpniętych z literatury naukowej wzorach analitycznych otrzymanych z rozwiązania zagadnienia cieplnego tarcia dla rzeczywistego obszaru kontaktu. W drugim podejściu wykorzystuje się ustaloną na podstawie badań eksperymentalnych eksponencjalną zależność pomiędzy temperaturą średnią nominalnego obszaru kontaktu i temperaturą błysku. Wykazano, że wzory eksperymentalne są uzasadnione przy wyznaczaniu temperatury maksymalnej hamulca tarczowego podczas hamowania jednokrotnego.

W rozdziale ósmym „Sprzężone modele numeryczne procesu nagrzewania tarczowego w układzie nakładka-tarcza podczas hamowania wielokrotnego” zaproponowano trzy modele obliczeniowe do wyznaczenia temperatury maksymalnej hamulca tarczowego podczas hamowania wielokrotnego. W modelu uwzględniono:

- wrażliwość termiczną współczynników tarcia i intensywności zużycia masowego powierzchni kontaktu;
- wrażliwość termiczną termofizycznych właściwości materiałów;
- zmienne w czasie ciśnienie kontaktowe;
- zależność współczynnika wymiany ciepła od prędkości pojazdu.

W każdej chwili procesu hamowania brano pod uwagę wzajemną zależność temperatury średniej powierzchni kontaktu, temperatury błysku w rzeczywistym obszarze kontaktu i temperatury objętościowej tarczy. Osiowosymetryczny model obliczeniowy do wyznaczenia maksymalnej temperatury przy hamowaniu wielokrotnym uwzględniał wpływ materiału nakładek na temperaturę poprzez zadanie współczynnika rozdzielania strumieni ciepła. Dwuwymiarowy układ równań cieplnej dynamiki tarcia i zużycia opisujący proces hamowania wielokrotnego zawiera zagadnienie cieplne tarcia z warunkami doskonałego kontaktu cieplnego nakładek z tarczą. Przy takim podejściu współczynnik rozdzielania strumieni ciepła otrzymuje się z rozwiązania zagadnienia. Natomiast przestrzenny trójwymiarowy nieliniowy model obliczeniowy opracowano dla tarczy wentylowanej z uwzględnieniem zależności współczynnika wymiany ciepła od prędkości pojazdu.

Wszystkie rozdziały monografii zawierają szczegółowe wnioski. W podsumowaniu wymieniono najważniejsze rezultaty otrzymane w monografii oraz sformułowano wnioski końcowe.

Przedstawione wyżej prace stanowią jednotematyczny zbiór ośmiu artykułów opublikowanych w renomowanych czasopismach o zasięgu światowym i podsumowującej monografii naukowej oraz dokumentują istotne osiągnięcie naukowe Habilitanta. W pracach Kandydata został rozwiązany ważny problem naukowy polegający na opracowaniu nowych efektywnych nieliniowych modeli numerycznych do wyznaczenia nieustalonego pola temperatury generowanego podczas pracy tarczowego układu hamulcowego. Nowe modele obliczeniowe zaproponowane przez Habilitanta uwzględniają zmianę ciśnienia kontaktowego w czasie hamowania, wzajemny związek zmiany ciśnienia w układzie hamulcowym, prędkości poślizgu, temperatury, zużycia termomechanicznego masowego powierzchni ciernych nakładek i tarczy, współczynnika wymiany ciepła i wrażliwości termicznej materiałów nakładki i tarczy. Te modele również uwzględniają tarczowe, mechaniczne i termofizyczne właściwości materiałów, konstrukcyjne cechy hamulca, warunki jego pracy i tryb eksploatacji. Ustalono, że przyjęcie średniej wartości współczynnika tarcia może powodować wyraźne różnice w wartościach temperatury obliczonej i uzyskanej przez pomiary w badaniach eksperymentalnych. Temperaturę maksymalną, osiąganą na powierzchniach ciernych każdej tarczy, wyznaczano poprzez sumowanie temperatury średniej na tych powierzchniach oraz temperatury błysku,

uwzględniono parametry chropowatości powierzchni kontaktu. Modele obliczeniowe do wyznaczenia temperatury maksymalnej hamulca tarczowego uogólniono na przypadek hamowania wielokrotnego. Na szczególną uwagę zasługuje ten fakt, że wszystkie obliczenia zostały wykonane dla realnych materiałów wykorzystywanych w samochodowych, kolejowych i lotniczych układach hamulcowych (metaloceramika FMC-11 lub FC-16L zestawiona z żeliwną tarczą, węglowy materiał kompozytowy Termar-ADF). Zaproponowane nowe modele numeryczne pozwalają oszacować z wysokim stopniem wiarygodności charakterystyki robocze hamulców wykonanych z różnych materiałów przy różnych cechach konstrukcyjnych elementów pary ciernej. Prowadzone na ich podstawie symulacje komputerowe mogą prowadzić do redukcji kosztów oraz skrócenia czasu wdrażania hamulców.

IV. Ocena dorobku Kandydata

1. Dorobek naukowy

Dr Piotr Grześ posiada wystarczający inny dorobek naukowy (poza wyżej wymienionym osiągnięciem naukowym). Po uzyskaniu stopnia doktora Kandydat opublikował 5 rozdziałów w monografii naukowej „Analityczne i numeryczne modelowanie procesu nieustalanej generacji ciepła w elementach tarczowych układów hamulcowych” wydanej w 2014 r. w Oficynie Wydawniczej Politechniki Białostockiej, hasło w prestiżowej „Encyclopedia of Thermal Stresses” (2014) oraz 11 artykułów, w tym 3 artykuły w czasopismach należących do bazy Journal Citation Reports:

- 1) A.A. Yevtushenko, **P. Grześ**, A. Adamowicz (2015). Numerical analysis of thermal stresses in disk brakes and clutches (a review). Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, vol. 67, No. 2, pp. 170–188; IF 2015: 1.937; 30 punktów według Części A Wykazu czasopism naukowych MNiSW (P. Grześ – udział 33.3%)
- 2) **P. Grześ**, W. Oliferuk, A. Adamowicz, K. Kochanowski. P. Wasilewski, A.A. Yewtushenko (2016). The numerical-experimental scheme for the analysis of temperature field in a pad-disc braking system of a railway vehicle at single braking. International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 75, pp. 1–6; IF 2016: 3.718; 35 punktów według Części A Wykazu czasopism naukowych MNiSW (P. Grześ – udział 25%)
- 3) A.A. Yevtushenko, M. Kuciej, **P. Grześ**, P. Wasilewski (2017). Temperature in the railway disc brake at a repetitive short-term mode of braking. International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 84, pp. 102–109; IF 2017: 4.463; 35 punktów według Części A Wykazu czasopism naukowych MNiSW (P. Grześ – udział 25%)

Sumaryczny impact factor według listy Journal Citation Reports, zgodnie z rokiem opublikowania, ośmiu artykułów stanowiących osiągnięcie naukowe Habilitanta wynosi 16.020; dorobek publikacyjny tych artykułów, zgodnie

z rokiem opublikowania, wynosi 275 punktów według Wykazu czasopism naukowych MNiSW. Sumaryczny impact factor według listy Journal Citation Reports, zgodnie z rokiem opublikowania, wyżej wymienionych trzech artykułów wynosi 10.118; dorobek publikacyjny tych artykułów, zgodnie z rokiem opublikowania, wynosi 100 punktów według Wykazu czasopism naukowych MNiSW. Sumaryczny impact factor publikacji Kandydata po uzyskaniu stopnia doktora w czasopismach należących do bazy Journal Citation Reports wynosi 26.138; dorobek publikacyjny tych artykułów wynosi 375 punktów według Wykazu czasopism naukowych MNiSW.

Indeks Hirscha według bazy Web of Science: h-index = 10

W wykazie osiągnięć naukowo-badawczych Habilitant podał liczbę cytowań swoich publikacji według bazy Web of Science stanem na 12.03.2019 r.:

Ogólna liczba cytowań: 237

Bez autocytowań: 163

Chcę podkreślić, że chociaż indeks Hirscha pozostał ten sam, ale ilość cytowań stanem na 28.08.2019 r. znacząco się zwiększyła:

Ogólna liczba cytowań: 276

Bez autocytowań: 194

Habilitant zaprezentował wyniki swoich badań naukowych na 5 konferencjach krajowych i 9 międzynarodowych, zwłaszcza na konferencji 9th European Solid Mechanics Conference (ESMC 2015), Leganés-Madrid, Spain pełnił rolę przewodniczącego sesji.

Kandydat jest członkiem Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej oraz European Mechanical Society (EUROMECH).

Dr Piotr Grześ był członkiem komitetu organizacyjnego dwóch konferencji:

- XII Konferencja „Nowe kierunki rozwoju mechaniki”, 22–25 marca 2017 r., Białystok–Supraśl.
- 10th International Symposium on Mechanics of Materials and Structures, June 2–6, 2019, Augustów, Poland.

Udział w wielu konferencjach krajowych i międzynarodowych, członkostwo w towarzystwach naukowych świadczy o wyróżniającej aktywności Habilitanta w życiu naukowym środowiska i o zauważalnej w kraju i świecie pozycji naukowej Habilitanta.

Dr Piotr Grześ był recenzentem wielu publikacji w renomowanych czasopismach międzynarodowych.

Dr Piotr Grześ jest dojrzałym badaczem, był kierownikiem lub wykonawcą kilku projektów badawczych:

- Kierownikiem projektu badawczego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego służącego rozwojowi młodych naukowców „Analiza pola temperaturowego

i zużycia termomechanicznego nakładki i tarczy hamulcowej na podstawie rozwiązania numerycznego z wykorzystaniem MES układu równań cieplnej dynamiki tarcia”, 2014 r. – 2015 r., nr MB/MW/8/2014

- Kierownikiem projektu badawczego Narodowego Centrum Nauki „Modelowanie numeryczne nagrzewania tarcowego w układzie hamulcowym z uwzględnieniem wzajemnej zależności prędkości, temperatury i czułości termicznej materiałów”, 2016 r. – 2019 r., nr 2015/19/D/ST8/00837 (G/WM/3/2016)
- Wykonawcą projektu badawczego Narodowego Centrum Nauki „Analityczne i numeryczne modelowanie procesu nieustalonej generacji ciepła w elementach tarczowych układów hamulcowych”, 2011 r. – 2014 r., nr 2011/01/B/ST8/07446 (G/WM/2/2011)
- Wykonawcą pracy statutowej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Zagadnienia mechaniki materiałów niejednorodnych i anizotropowych”, 2013 r. – 2016 r., nr S/WM/1/2013
- Wykonawcą pracy statutowej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Mechanika ośrodków niejednorodnych z uwzględnieniem efektów termicznych”, 2017 r. – 2020 r., nr S/WM/4/2017

Stwierdzam, że Kandydat wykazuje bardzo dobrą aktywność w realizacji projektów badawczych, co jest dowodem uznania dla pozycji naukowej Kandydata.

Habibitant otrzymał kilka nagród za działalność naukową:

- Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla doktorantów za wybitne osiągnięcia (w roku akademickim 2012/2013)
- Stypendium Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców (2016 r. – 2019 r.)
- Nagroda naukowa III stopnia im. Profesora Michała Życzkowskiego Komitetu Mechaniki PAN (2015 r.)
- Nagrody zespołowe III stopnia Rektora Politechniki Białostockiej za wyróżniającą się działalność naukową i organizacyjną (2015 r. – 2018 r.)

Ten aspekt dorobku Kandydata oceniam jako wyróżniający .

2. Dorobek dydaktyczny

Kandydat jest nauczycielem akademickim i uprawia szeroką działalność dydaktyczną. Habibitant prowadzi wykłady i projekty na Politechnice Białostockiej, zwłaszcza:

- komputerowo wspomagane projektowanie;
- metoda elementów skończonych;
- technologia informacyjna;
- podstawy informatyki;

- thermal analysis;
- mathematical modelling of physical problems.

Kandydat poszerza swoje kompetencje biorąc udział w warsztatach „Poprawne przygotowanie materiałów do e-learningu” oraz „Wykorzystanie materiałów do prowadzenia zajęć” w ramach projektu „PB2020 – Zintegrowany Program Rozwoju Politechniki Białostockiej” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, Program Operacyjny Wiedza Edukacja Rozwój (Białystok, 22–26 października 2018 r.).

Dr Piotr Grześ był opiekunem dydaktycznym studentów studiów stacjonarnych pierwszego stopnia na kierunku mechanika i budowa maszyn Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej.

Na podkreślenie zasługuje promotorstwo pomocnicze we wszczętym w 2017 r. przewodzie doktorskim mgr. inż. Piotra Wasilewskiego „Badania doświadczalne i modelowanie numeryczne rozkładu temperatury w układach hamulcowych pojazdów szynowych” na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej. Był promotorem 10 prac dyplomowych realizowanych na kierunkach mechanika i budowa maszyn oraz inżynieria biomedyczna.

Bardzo wysoko oceniam dorobek dydaktyczny Kandydata.

3. Działalność organizacyjna

Habilitant był lub nadal jest członkiem:

- Wydziałowej Komisji ds. Jakości Kształcenia (sekretarz od 2016 r.);
- Uczelnianej Komisji Dyscyplinarnej dla Studentów Politechniki Białostockiej od 2018 r.;
- Komisji Rewizyjnej Oddziału Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej w Białymstoku od 2019 r.;
- Zespołu przygotowującego Raport Samooceny na potrzeby oceny jakości kształcenia na kierunku mechanika i budowa maszyn przeprowadzanej przez Polską Komisję Akredytacyjną w 2017 r.;
- Komisji przetargowej powołanej do przeprowadzenia postępowania w trybie przetargu nieograniczonego na „Zakup sprzętu komputerowego na potrzeby różnych jednostek Politechniki Białostockiej” w 2016 r.

Bardzo pozytywnie oceniam ten aspekt dorobku Kandydata.

V. Wniosek końcowy

W związku z powyższym stwierdzam, że osiągnięcie naukowe dr. Piotra Grzesia „Numeryczne modelowanie procesu generacji ciepła w hamulcach tarczowych z uwzględnieniem wzajemnego wpływu mocy tarcia, temperatury, wrażliwości termicznej materiałów i chłodzenia konwekcyjnego” przedłożone w postaci 8 jednotematycznych publikacji w czasopiśmie znajdujących się w bazie Journal Citation Reports oraz monografii naukowej stanowi znaczący wkład

w rozwój dyscypliny naukowej mechanika. Osiągnięcie naukowe, istotna aktywność naukowa, działalność dydaktyczna i organizacyjna Habilitanta spełniają w całej rozciągłości wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (z późniejszymi zmianami) oraz Rozporządzenia MNiSW z dnia 1 września 2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego. W związku z tym wnoszę o przyjęcie dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego Habilitanta jako podstawy do nadania dr. Piotrowi Grzesiowi przez Radę Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie naukowej mechanika.


.....
prof. dr hab. Yuriy Povstenko