



prof. dr hab inż. Waldemar Kuczynski
Politechnika Koszalińska Wydział Mechaniczny
Katedra Energetyki
75 – 620 Koszalin, ul. Raclawicka 15-17
Tel. 94 3478-420,438
email: waldemar.kuczynski@tu.koszalin.pl



Koszalin, 26.03.2021 r

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Zacharko pt.:

„Influences of thermal resistnce on heat distribution of selected parts of low-pressure turbine of aircraft engines – Wpływ termicznego oporu kontaktowego na wymianę ciepła wybranych części turbin niskiego ciśnienia silników lotniczych”

Recenzję wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza dr hab. inż. Aleksandra Mazurkova prof. PRz w oparciu o pismo nr RM-530-23-03/2020/21 z dnia 28.01.2021 r.

Rozprawa doktorska powstała pod kierunkiem **dr hab. inż. Roberta Smusza jako promotora.**

1. Sylwetka Doktoranta

Mgr inż. Bartosz Zacharko urodził się 09.10.1992 roku w Przemyślu gdzie w 2011 roku ukończył II Liceum Ogólnokształcące im. Kazimierza Morawskiego. Następnie rozpoczął studia I stopnia inżynierskie na kierunku Lotnictwo i Kosmonautyka w Politechnice Rzeszowskiej na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Kosmonautyki. W 2015 roku uzyskał dyplom inżyniera pracą pt. *"Wyznaczenie prędkości krytycznych wirnika sprężarki osiowej silnika turbinowego"* i kontynuował kształcenie na studiach II stopnia na tym samym kierunku. W 2016 roku obronił pracę magisterską pt. *"Badanie wpływu pola temperatury na rozkład wytężenia materiału turbiny silnika przepływowego"* i rozpoczął studia doktoranckie w Politechnice Rzeszowskiej w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn. W ramach realizacji rozprawy doktorskiej zredagował pod opieką naukową dr hab. inż. Roberta Smusza opracowanie pt.: *Wpływ termicznego oporu kontaktowego na wymianę ciepła wybranych części turbiny niskiego ciśnienia silników lotniczych* będące przedmiotem tej recenzji.

W obszarze dydaktycznym Doktorant prowadził zajęcia z następujących przedmiotów: Budowa silników lotniczych, semestr letni 2016/17, Silniki lotnicze i kosmiczne, semestr letni 2017/18 i 2018/19, Metody numeryczne w budowie i eksploatacji konstrukcji lotniczych, semestr letni 2019/20.

Mgr inż. Bartosz Zacharko jest uczestnikiem ogłoszonej w 2018 r. II edycji programu „Doktorat wdrożeniowy” organizowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Partnerem ze strony sektora przemysłowego w realizacji tego programu jest firma lotnicza *MTU Aero Engines Polska* gdzie Doktorant jest zatrudniony od 2017 roku na stanowisku Inżyniera ds. termodynamiki.

2. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej jest opracowanie korelacji obliczeniowych mających usprawnić modelowanie procesu wymiany ciepła w obszarach połączeń lub bezpośredniego kontaktu wybranych części turbinowego silnika lotniczego. W szczególności rozpatrzono wskazane zagadnienie dla takich miejsc konstrukcyjnych jak: platforma zewnętrzna łopatek kierowniczych turbiny niskiego ciśnienia będąca w kontakcie z zewnętrzną obudową turbiny, połączenie śrubowe obudowy turbiny z jej kołnierzem wylotowym oraz miejsce styku łopatki wirującej z dyskiem. Analiza literatury oraz praktyka inżynierska wykazuje, że obecnie obszary te w procesie modelowania rozpatruje się za pomocą uproszczonych korelacji, w których pomija się zjawisko oporu termicznego w miejscach połączeń.

Podstawą rozpatrzenia tych zagadnień jest fakt, że uzyskiwane za pomocą obecnie stosowanych metod obliczeniowych rozkłady pól temperatur wykazują znaczne rozbieżność z wynikami badań eksperymentalnych pozyskanych podczas testowania zarówno silników lotniczych jak i innego typu maszyn przepływowych (np. przemysłowego turbozespołu gazowego). Brak kompatybilności między stosowanymi obecnie metodami modelowania a empirycznymi parametrami pracy poszczególnych komponentów silników lotniczych skutkuje błędną identyfikacją obliczeniowych parametrów eksploatacyjnych, takich jak wytrzymałość statyczna i zmęczeniowa projektowanych elementów składowych tych układów. Niwelacja tak znacznych rozbieżności ma w założeniu skorygować znacząco i zmniejszyć niepewność wszelkich analiz numerycznych w tym obszarze co wpłynie pozytywnie na proces decyzyjny w zakresie projektowania i konstruowania silników lotniczych.

W ramach realizacji rozprawy doktorskiej, przeprowadzono szczegółową analizę dotyczącą zidentyfikowania wszelkich czynników mogących mieć wpływ na wzrost termicznego oporu kontaktowego (ang. TCR) w poszczególnych komponentach turbiny niskiego ciśnienia silnika lotniczego. Określono rodzaj wymiany ciepła, który jest konieczny do uwzględnienia w poprawnej korelacji obliczeniowej. Rozpatrzono zagadnienia wymiany ciepła na drodze przewodzenia między elementami pozostającymi w kontakcie i promieniowania oraz konwekcji podczas przepływu gazu w szczelinach między powierzchniami kontaktowymi. W analizie tej uwzględniono również pozostałe czynniki powodujące wzrost oporności cieplnej, tj.: właściwości fizykochemiczne materiału i przepływającego płynu, siły nacisku, ciśnienia i siły masowe, struktury warstw wierzchnich (fizyczną i geometryczną), rodzaj kontaktu i jego zmienność w czasie, warstwy ochronne (powłoki), wibracje silnika.

Wskazane powyżej założenia ukierunkowują zakres analizy będącej przedmiotem opracowania na zagadnienia o charakterze nie tylko makroskopowym ale również w zakresie mikrostruktur powierzchni kontaktu. Jednocześnie determinuje to konieczność uwzględnienia zagadnień z zakresy mechaniki płynów w przestrzeniach takich jak mini- lub mikrokanaly. Ze względu na chropowatość i niedoskonałość wykonania powierzchni, obszary takie mają miejsce w przypadku kontaktu elementów konstrukcyjnych przemieszczających się względem siebie lub pozostających w stałym połączeniu. Zarówno jakość wykonania poszczególnych części składowych silnika samolotowego jak i występujące między nimi przestrzenie mają wpływ na rodzaj i wartość wymiany ciepła. Dodatkowym parametrem determinującym ten proces jest sposób eksploatacji i wynikające z tego zużycie lub odkształcenia powodujące znaczne dyferencje w procesie określenia wartości współczynnika wymiany ciepła w miejscach połączenia analizowanych elementów konstrukcyjnych.

W celu realizacji powyższych założeń zaproponowano własny autorski skrypt obliczeniowy opracowany przez Doktoranta i stworzony w języku Python. Pozwoliło to na zamodelowanie odpowiedniej powierzchni w zależności od ich stanu rozpatrywanych elementów konstrukcyjnych. W szczególności uwzględniono stochastyczny charakter chropowatości mających miejsce na takich powierzchniach. Prowadziło to do uwzględnienia w procesie tworzenia kodu programu podstawowych parametrów opisujących rozpatrywane strefy materiału jak: średnia arytmetyczna wysokość profilu chropowatości, średnie bezwzględne nachylenie, a także czynniki geometryczne takie jak grubość obiektu i odległość separacyjna pomiędzy dwoma powierzchniami. Analiza topografii tak sformułowanych struktur została przeprowadzona za pomocą *rozkładu Gaussa*, co pozwoliło na interpolowanie „ostro zakończonych” krawędzi tego obszaru oraz automatyczną identyfikację miejsc nakładania się tych powierzchni, w których tworzyły się punkty kontaktowe. Następnie stosując metodę triangulacji *Delanuary'a*, możliwym było utworzenie siatki tzw. *polygonal mesh*, którą przetransponowano z plików typu „.stl” na format „.step”. Umożliwiło to przekonwertowanie stworzonego w programie Python kodu do komercyjnego środowiska HyperWorks. Dalsze działania polegające na wykorzystaniu modułów HyperMesh, AcuSolve (solver numeryczny z obszaru CFD) pozyskanych od dostawcy firmy Altair dało Doktorantowi narzędzie do przeprowadzenia analiz badających wpływ poszczególnych kontaktowych sposobów wymiany ciepła (TCC - thermal contact conductance).

Realizując powyższe wskazania rozważono proces przewodzenia dla pięciu różnych stochastycznie wygenerowanych geometrii par kontaktów elementów konstrukcyjnych z powietrzem jako medium międzywarstwowym i różnymi temperaturami pracy powierzchni. Uwzględniając wpływ temperatury na zmienność właściwości materiału takich jak przewodność, ciepło właściwe i gęstość uzyskano wyniki wskazujące na stały trend wynoszący 14 [%] odchylenia standardowego od średniej uzyskanej wartości TCC.

Zbadano wpływ promieniowania oraz konwekcji swobodnej i wymuszonej. Stwierdzono, że strumień ciepła przekazanego na sposób promieniowania radiacyjnego dla różnicy temperatur między powierzchniami wynoszącymi 10[K] wyniósł 14[%] całkowitego strumienia ciepła, zaś dla różnicy 100[K] jego udział wzrósł do poziomu 32[%].

W przypadku konwekcji swobodnej dla której uzyskano wartość liczby kryterialnej *Grashofa* na poziomie ok. 10^{-5} stwierdzono, że praktycznie nie ma miejsca na taki rodzaj wymiany ciepła w mikrokontaktach. Wymuszona konwekcja zmieniała o około 6% całkowitą wartość współczynnika przejmowania ciepła w przepływie przez mikroszczelinę dla danych wejściowych, co również okazało się mieć bardzo mały wpływ. Wykonano dodatkowe badania numeryczne mające na celu wykazanie wpływu zmiany temperatury płynu na współczynnik przejmowania ciepła. Stwierdzono, również że w tym przypadku charakter zmian okazał się nieistotny, co ostatecznie wyklucza konwekcję jako czynnik mający znaczący wpływ na opór cieplny w mikrokanalach.

W celu zbadania konwekcji wymuszonej zasymulowano przepływ płynu przez mikrokanal kontaktu obudowy turbiny niskiego ciśnienia z łopatką statorową i warunkach brzegowych towarzyszących odejściu i wznoszeniu samolotu (Take-Off). Założono, że przy stałych temperaturach powierzchni ciał stałych przeprowadzi się weryfikację zmian temperatury płynu i ich wpływ na współczynnik przejmowania ciepła na powierzchniach. Analizę wykonano w zakresie od 600[K] do 1000[K] dla temperatury przepływającego medium z zastosowanym przyrostem 100[K].

Kolejnym aspektem w przedstawionej rozprawie doktorskiej było zaimplementowanie w celach obliczeniowych *Metody Lattice-Boltzmanna* (LBM) dla modyfikacji tradycyjnych sposobów modelowania zjawisk przepływowych. W zagadnieniach tego typu wykorzystuje się standardowo platformę CFD XFlow z solverem opartym na założeniu kinetycznych oddziaływań cząsteczek.

W przypadku *Metody Lattice-Boltzmann* możliwym jest prowadzenie rozwiązań zaawansowanych problemów nawet w obecności złożonych geometrii. Przedstawiona w opracowaniu metodologia wykazała, że metoda ta może być z powodzeniem stosowana dla analizy mikroprzepływów termicznych. Okazało się, że elementy XFlow wykazują w modelowaniu znaczne zbieżności z przyjętymi założeniami, co wynika ze stabilności kodu obliczeniowego, jego znacznej dokładności, stabilności i wydajności w zakresie prognozowania schematu przepływu. Stwierdzono, że metoda ta umożliwia analizę skomplikowanych mikroprzepływów występujących w odniesieniu do złożonych geometrii.

Dokładność procedur obliczeniowych stosowanych w programach CFD oraz zaproponowanych przez Doktoranta ich modyfikacji w odniesieniu do rozpatrywanych zagadnień dotyczących elementów konstrukcyjnych silników samolotowych zweryfikowano w odniesieniu do dostępnych w literaturze wyników badań eksperymentalnych. Przeprowadzone analizy numeryczne wykazały zadowalającą zgodność potwierdzając słuszność podjętych działań.

Opracowaną autorską korelację umożliwiającą wyznaczenie przewodności cieplnej w miejscach kontaktu materiałów stosowanych w konstrukcji silników samolotowych poddano weryfikacji statystycznej. Korelacja ta oparta na średniej arytmetycznej chropowatości i odległości rozdziału odnosi się do powszechnie stosowanych parametrów opisujących jakość wykończenia powierzchni wykorzystywanych w branży lotniczej materiałów. Uwzględniając zmienną chropowatość i odległość separacji przeprowadzono 24 oddzielne symulacje w celu uzyskania średniej wartości TCC (thermal contact conductance). W oparciu o program MATLAB przeprowadzono analizę umożliwiającą uzyskanie przybliżenia otrzymanych wyników za pomocą powierzchni określonym wielomianem nieliniowym 4 stopnia, będącym korelacją końcową. Formuła ta ma być przetestowana i skonfrontowana z narzędziami i modelami stosowanymi w firmie MTU Aero Engines, która jest partnerem z obszaru przemysłowego w realizacji projektu „Doktorat wdrożeniowy”, którego beneficjentem jest Doktorant przedstawionej do oceny rozprawy.

3. Omówienie treści pracy

Rozprawę doktorską zredagowano w języku angielskim na 170 stronach w 7 rozdziałach z wykazem oznaczeń i literatury, załącznikami oraz streszczeniami w języku polskim i angielskim. Zauważa się wyraźny podział opracowania na część teoretyczną, czyli analizę literatury z rozpatrywanego tematu, praktyczną obejmującą propozycję własnej modyfikacji modelu matematycznego oraz analizę uzyskanych wyników, którą umieszczono w podsumowaniu. W szczególności w opracowaniu ujęto następujące informacje:

We **Wprowadzeniu (rozd. 1)** Doktorant przedstawia genezę swojej rozprawy doktorskiej oraz podstawowe informacje dotyczące realizacji opracowania. Ujęto tutaj podstawowe informacje dotyczące rozpatrywanych zjawisk termicznych występujących w elementach konstrukcyjnych silników samolotowych. W tej części rozprawy syntetycznie przedstawiono wstępnie informacje dotyczące: termicznego oporu kontaktowego (TCR), przewodności cieplnej kontaktu (styku) (TCC) oraz metody obliczeniowej *Lattice Boltzmann*.

W **rozd. 2**, Doktorant przedstawił podstawowe wiadomości z zakresu metod opisu litych, chropowatych powierzchni materiałów stosowanych w elementach silników samolotowych. Z doświadczenia wiadomo, że żadna powierzchnia nie jest idealnie płaska. Na poziomie mikroskopowym obserwuje się wiele „szczytów” i „dolin”, które określane są jako chropowatość

i które charakteryzują jakość rozpatrywanej powierzchni. W literaturze wyróżnia się trzy sposoby identyfikacji i opisu powierzchni: deterministyczny, stochastyczny i fraktalny. W rozdziale tym opisano każdy z tych sposobów, przedstawiając równania i założenia rządzące każdym z nich z osobna. Ze względu na odmienny charakter opisu powierzchni istotnym jest dobranie odpowiedniego jego typu dla konkretnej specyfiki badanego zagadnienia wymiany ciepła.

Rozdz. 3 poświęcono opisowi sposobów wymiany ciepła w miejscu połączenia (kontaktu) dwóch chropowatych ciał stałych. Przedstawiono w tej części pracy wykaz czynników determinujących i wpływających na tzw. termiczny opór kontaktowy uwzględniając parametry oddziałujące na wymianę ciepła w tym procesie. W oparciu o zmiany temperatury i odniesienia ich wartości do liczby kryterialnej *Knudsen*, określającej odległość międzycząsteczkową, dokonano charakterystyki struktur przepływu. Przedstawiono również stosowane obecnie korelacje obliczeniowe wykorzystywane do określenia wartości współczynnika przejmowania ciepła na granicach ośrodków typu metal-powietrze-metal. Przedstawiono opisowo podstawy modeli jedno- i wielokontaktowych zastosowanych do sformułowania rozpatrywanych korelacji, a także sposoby przenoszenia energii na granicy medium na poziomie atomowym. W rozdziale tym, zasygnalizowano również konieczność rozważenia wpływu otoczenia na badane elementy konstrukcyjne silnika samolotowego w postaci drgań i ich wpływu na wymianę i rozprzestrzenianie się energii na sposób ciepła. Kolejnym opisanym obszarem były zagadnienia związane z efektem histerezy przyczyniającemu się do nieliniowych zmian oporu cieplnego w kontakcie w miejscach połączeń śrubowych.

W **rozd. 4** poświęcono na analizę numerycznych modeli obliczeniowych stosowanych w praktyce dla obliczeń przepływowych zbudowanych w oparciu o równania kinetyczne *Boltzmana* oraz *Metodę Lattice Boltzmana* (LBM). Rozpatrzono podstawy jej wykorzystania wskazując na niedociągnięcia oraz atrybuty w odniesieniu do sposobu identyfikacji propagacji cząstek płynu w zależności od wymiaru problemu, rodzaju zastosowania, granic stosowalności, warunków brzegowych, sposobu postępowania w przypadku wystąpienia zakrzywień krawędzi rozpatrywanych obiektów oraz w odniesieniu do rozwiązania zagadnień sprzężonej wymiany ciepła.

Rozdz. 5 jest opisem wykonanych prac modelowych polegających na stworzeniu autorskiego kodu obliczeniowego w programie Python i jego implementacji do komercyjnych systemów obliczeniowych. Opis tej części pracy znajduje się w pkt. 2 recenzji.

W **rozd. 6** to podsumowanie i wnioski końcowe oraz podkreślenie najważniejszych, z punktu widzenia Doktoranta, wyników badań obliczeniowych i modelowych. Umieszczono tutaj również wskazania do sposobu weryfikacji i wykorzystania uzyskanych w rozprawie wyników.

W **rozd. 7** to wykaz literatury składający się z 154 pozycji bibliograficznych o prawidłowym do tematyki pracy doborze.

Na końcu opracowania w Załączniku umieszczono przykładowe skrypty obliczeniowe wykonane przez Doktoranta w trakcie realizacji rozprawy doktorskiej.

4. Osiągnięcia uzyskane w pracy

Osiągnięcia pracy to:

- propozycje własnych modeli obliczeniowych i optymalizacja procesu wymiany ciepła w elementach konstrukcyjnych odrzutowych silników samolotowych,
- możliwość praktycznego wykorzystania opracowanych metod analitycznych, co zostało zweryfikowano w odniesieniu do wyników badań eksperymentalnych opublikowanych przez innych autorów.

Uważam, że wskazane elementy świadczą o uniwersalności zaproponowanych sposobów modelowania wymiany ciepła we wskazanych w rozprawie aspektach.

5. Oryginalność pracy

Przedstawione i umieszczone w pracy wyniki mają charakter aplikacyjny i mogą być podstawą do wdrożenia przemysłowego. Wniosek ten jest poparty faktem, że realizacja rozprawy doktorskiej miała miejsce w oparciu o projekt „Doktorat wdrożeniowy”. Doktorant wskazuje konkretnego partnera z sektora przemysłowego, który ma zamiar wykorzystać uzyskane wyniki badań w swojej działalności projektowo-konstrukcyjnej.

6. Uwagi krytyczne redakcyjne i dyskusyjne do pracy

Opracowanie przedstawione do recenzji zostało zredagowane w języku angielskim i zapewne powodem takiego podejścia jest współpraca Doktoranta z firmą *MTU Aero Engines Polska* gdzie jest zatrudniony od 2017 roku na stanowisku Inżyniera ds. termodynamiki i z którą realizował projekt „Doktorat wdrożeniowy”. Recenzent nie posiadający znajomości języka na poziomie *native speaker* może ogólnie stwierdzić, że nie zauważa pod tym względem poważnych uchybień w tym opracowaniu. Nasuwa się tylko jedna uwaga o charakterze redakcyjnym, mianowicie brak wzoru równania ciągłości modelu *Boltzmana* na stronie 77 opracowania. Konsekwencją jest to, że w dalszej części pracy pojawia się nieprawidłowa numeracja równań.

Uwagi o charakterze ogólnym:

- 1) W opracowaniu brakuje analizy weryfikującej uzyskane wyniki badań modelowych w odniesieniu do własnego eksperymentu. Niemniej Doktorant wskazał logiczną przyczynę tego braku, jednocześnie informując jak zostanie to w przyszłości uzupełnione
- 2) W pracy uzyskane wyniki modelowania odniesiono do eksperymentów innych autorów o czym wspomniałem w pkt. 4 tej opinii. Osobiście uważam, że być może ten aspekt może wskazywać na użyteczność uzyskanych modeli obliczeniowych, ponieważ stan ten wskazuje na pełną bezstronność weryfikacji.

Podsumowując tę część recenzji, stwierdzam, że praca jest zredagowana odpowiednim technicznym i naukowym językiem, z dobrze dobranym materiałem ilustracyjnym. Zachowano kolejność przywołanych cytowań z literatury.

Przedstawione powyżej uwagi mają przede wszystkim charakter dyskusyjny i redakcyjny i w niczym nie umniejszają wartości merytorycznych tego opracowania, które oceniam wysoko.

7. Podsumowanie treści pracy i uwag

Uważam, że aplikacyjny charakter przedstawionych wyników modelowania zweryfikowanych wynikami badań eksperymentalnych innych autorów niż Doktorant daje podstawę do uznania, że cel pracy został osiągnięty. Rozpatrywane zagadnienia powinny być nadal rozwijane i są znaczącym poznawczo obszarem, który moim zdaniem Autor opracowania winien nadal poszerzać. Nadzieję na to, że się tak stanie daje informacja o współpracy z przedstawicielem przemysłu *MTU Aero Engines Polska*, który może podjąć się weryfikacji uzyskanych modeli obliczeniowych w odniesieniu do swoich produktów a następnie ich wdrożeniu.

8. Ocena pracy i wniosek końcowy

Stwierdzam, że przedłożona praca zawiera oryginalne ujęcie problemu naukowego i świadczy o opanowaniu przez jej Autora mgr inż. Bartosza Zacharko naukowych metod doświadczalnych, a także analityczno-numerycznych stosowanych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, a tym samym wyczerpuje warunki określone przez Ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce w art. 187 ust. 1-2 z dnia 20 lipca 2018 r i uzasadnia dopuszczenie jej do publicznej obrony o co wnioskuję.