

Warszawa, 02.09.2024 r.

Dr hab. inż. Łukasz Szablowski
Instytut Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska
ul. Nowowiejska 21/25, pok. 213, 00-665 Warszawa
tel. +48 22 234 15 44
e-mail: lukasz.szablowski@pw.edu.pl
identyfikator ORCID: 0000-0002-6646-2297

Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Marcina Froissarta zatytułowanej:
„Modelling of cooling of thermally highly loaded components using Thermal FSI method”

1. Podstawa wykonania recenzji

Recenzja ta została wykonana na podstawie decyzji Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN z dnia 4 lipca 2024 r. oraz pisma o sygnaturze RN-421-1/24 z dnia 5 lipca 2024 r. podpisanego przez Zastępcę Dyrektora ds. naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych PAN dr hab. inż. Grzegorza Żywicę, prof. IMP PAN.

2. Zawartość pracy

Do recenzji przedstawiono rozprawę doktorską w formie monografii naukowej napisanej w języku angielskim. Praca spisana została na 181 stronach w formacie A4. Praca składa się z 6 rozdziałów (w tym wstęp oraz podsumowanie). Rozprawa zawiera również dwa streszczenia: w języku angielskim i polskim. Na końcu pracy umieszczono bibliografię.

3. Przedmiot rozprawy

Praca dotyczy modelowania chłodzenia wysoko obciążonych cieplnie elementów turbin gazowych z użyciem metod numerycznych.

Przedmiotem rozprawy jest wykorzystanie metody Thermal FSI (ang. Fluid Solid Interaction) w procesie projektowania komory spalania z chłodzeniem transpiracyjnym. Metoda ta polega na połączeniu obliczeniowej mechaniki płynów (CFD - Computational Fluid Dynamics) z podobnymi obliczeniami dla ciał stałych (CSD - Computational Solid Dynamics).

4. Zasadność podjęcia tematu

W związku z przyjętym przez Unię Europejską kierunkiem dążącym do uzyskania zeroemisyjności oraz zagrożeniami związanymi z importem paliw kopalnych spoza UE konieczne wydaje się wprowadzanie coraz bardziej sprawnych technologii energetycznych a także wykorzystanie odnawialnych źródeł energii. Jako przyszłościowe źródła energii można wyszczególnić tutaj: ogniwa fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe, ogniwa paliwowe, turbiny gazowe zasilane wodorem i inne zero i niskoemisyjne źródła energii.

Opisane w pracy zagadnienia dotyczą modelowania matematycznego wysoko obciążonych elementów turbin gazowych takich jak komora spalania.

Tematyka zaproponowana w omawianej rozprawie doktorskiej jest bardzo istotna z naukowego a także z inżynierskiego punktu widzenia, ponieważ pozwala lepiej zrozumieć zagadnienia łączące kilka różnych procesów. Rozwiązania opracowane w ramach rozprawy przyczynią się do poszerzenia wiedzy w zakresie modelowania złożonych problemów technicznych. Przykładem zaprezentowanym w rozprawie jest chłodzona transpiracyjnie komora spalania turbiny gazowej. Rozważania zawarte w pracy mogą istotnie wpłynąć na rozwój turbin gazowych zasilanych wodorem, czyli paliwem nieemitującym dwutlenku węgla w trakcie spalania (w przypadku produkcji wodoru ze źródeł odnawialnych).

5. Teza i zakres rozprawy

Celem naukowym pracy jest potwierdzenie lub obalenie hipotezy badawczej:

"Opis zależności pomiędzy parametrami termiczno mechanicznymi a zmianą kompozytowej struktury wysokoobciążonych elementów turbin gazowych takich jak liner komory spalania jest możliwy do określenia. Ta zależność powinna uwzględniać występowanie złożonych zjawisk takich jak przesiąkanie chłodziwa przez materiał porowaty oraz gwałtowne jego odparowanie na wewnętrznej powierzchni komory spalania. Jest także możliwe przewidywanie procesu degradacji porowatego ceramicznego kompozytu (trwałość komponentu) na podstawie rozkładu obciążeń. Opis tych zjawisk jest niezbędny do utrzymania kontroli nad procesami zniszczenia".

Ponadto Doktorant postanowił odpowiedzieć w rozprawie na trzy dodatkowe pytania naukowe:

- Jaki jest wpływ wysokiej temperatury na strukturę i właściwości mechaniczne wykładziny (tzw. linera) komory spalania wykonanej z materiału ceramicznego?
- Jaki jest wpływ procesu parowania i skoku ciśnienia na właściwości strukturalne i mechaniczne materiału podczas obciążenia cieplnego?
- Jaki jest związek między obciążeniem termomechanicznym a pogorszeniem właściwości strukturalnych i mechanicznych?

Jak napisano wcześniej, praca składa się z 6 rozdziałów, które bardziej szczegółowo opisano poniżej.

W rozdziale pierwszym (wstęp) doktorant opisał dlaczego zainteresował się tematem pracy, przedstawił cel i zakres pracy, sformułował hipotezę badawczą oraz trzy dodatkowe pytania badawcze. W dalszej części wstępu opisano materiał kompozytowy WHIPOX, z którego zbudowany jest kluczowy element modelowanej przez Doktoranta komory spalania turbiny gazowej. W następnym podrozdziale wstępu przedstawiono przegląd konstrukcji komór spalania dla różnych turbin gazowych.

W rozdziale drugim opisano różne metody modelowania matematycznego przydatne z punktu widzenia zagadnienia przedstawionego w rozprawie. Omówiono tam modelowanie numeryczne przestrzeni obliczeniowej dla płynu (w tym model turbulencji, model spalania, model fazy dyskretniej oraz modelowanie przepływów przez ośrodki porowate) oraz dla ciała stałego (w tym model sprężystości izotropowej; ogólny model materiałów anizotropowych; klasyczną teorię laminatu; zachowanie przy uszkodzeniu warstwy; kryteria zniszczenia kompozytu; kryterium maksymalnego naprężenia, odkształcenia; kryterium zniszczenia Tsai-Wu; kryterium zniszczenia Tsai-Hill; kryterium awarii Hoffmana, kryterium odkształcenia Hashin; kryterium awarii Puck'a; model numeryczny dla kompozytu WHIPOX). W rozdziale drugim opisano również metody zastosowania przedstawionych wcześniej modeli dla obszaru ciała stałego. Następnie

przedstawiono zagadnienia związane z modelowaniem interakcji pomiędzy płynem a ciałem stałym (fluid-solid interaction-FSI), które są istotą napisanej przez Doktoranta rozprawy.

Metody walidacji przedstawionych modeli matematycznych opisano w rozdziale trzecim. Pokazano tam dwa przypadki walidacji: dla łopatki turbiny gazowej NASA C3X oraz dla komora spalania turbiny gazowej Tay.

W rozdziale czwartym opisano kolejne kroki budowy modelu matematycznego komory spalania z chłodzeniem transpiracyjnym wraz z przyjętymi przez Doktoranta założeniami i uproszczeniami. Szczegółowo opisano tam geometrię modelowanego urządzenia oraz zastosowane warunki brzegowe.

Wyniki otrzymane przy użyciu zbudowanego przedtem modelu matematycznego przedstawione zostały w rozdziale piątym.

Z kolei w rozdziale szóstym doktorant podsumował osiągnięcia swojej pracy, jak również uzasadnił postawioną przez siebie hipotezę badawczą i odpowiedział na trzy dodatkowe pytania badawcze sformułowane we wstępie.

Oprócz podziału przedstawionego powyżej Doktorant wyszczególnił w swojej pracy dziewięć głównych kroków:

- Krok 1. Weryfikacja metod badawczych polegająca na zbudowaniu modelu Thermal FSI i porównaniu wyników względem pomiarów.
- Krok 2. Budowa trójwymiarowej stacjonarnej analizy CFD mokrej komory spalania, biorącej pod uwagę spalanie metanu w czystym tlenie, odparowanie kropel wody wewnątrz płomienia i chłodzenie transpiracyjne.
- Krok 3. Budowa trójwymiarowego modelu CSD linera zrobionego z kompozytowej ceramiki.
- Krok 4. Eksperymentalne wyznaczenie współczynnika rozszerzalności cieplnej materiału CMC w laboratorium Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk.
- Krok 5. Zbudowanie i przeanalizowanie złożeniowego modelu CSD w stanie stacjonarnym i niestacjonarnym.
- Krok 6. Zbudowanie i przeanalizowanie modelu Thermal FSI zawierającego w sobie domeny płynu i ciała stałego.
- Krok 7. Porównanie rozkładu temperatury na ścianie linera pomiędzy modelami CFD a Thermal FSI.
- Krok 8. Określenie trwałości linera wykonanego z ceramiki kompozytowej (CMC) przy pomocy hipotezy wytrzymałościowej Tsai-Wu.
- Krok 9. Zaproponowanie modyfikacji metody obliczeniowej, która bierze pod uwagę zmianę właściwości mechanicznych porowatego linera, gdy jest on wypełniony nieściśliwym płynem.

6. Ocena oryginalności rozprawy

W rozprawie będącej przedmiotem niniejszej recenzji przedstawiono oryginalny sposób ulepszenia procesu konstrukcyjnego poprzez zastosowanie metody polegającej na połączeniu numerycznych metod obliczeniowych CFD i CSD. Metoda thermal FSI idealnie nadaje się do obliczeń aktywnie chłodzonych komponentów turbin gazowych, ponieważ pozwala dokładnie określić temperaturę pracy struktury. Zastosowanie oddzielnie analiz CFD i CSD skutkuje mniejszą dokładnością, co przekłada się na konieczność zastosowania większych

współczynników bezpieczeństwa poprzez obniżenie maksymalnej temperatury pracy dla turbiny gazowej. Oznacza to, że zastosowane przez Doktoranta rozwiązanie (metoda thermal FSI) w procesie projektowania turbiny gazowej prowadzi do poniesienia maksymalnej temperatury obiegu, co wpływa bezpośrednio na podniesienie sprawności cieplnej projektowanej turbiny.

7. Wartości użytkowe pracy

W pracy zaprezentowano metody obliczeniowe będące przydatne z punktu widzenia inżynierskiego. Metody te służą lepszemu zamodelowaniu skomplikowanych problemów konstrukcyjnych, takich jak w przedstawionym przykładzie komory spalania z chłodzeniem transpiracyjnym. W omawianym przypadku mamy do czynienia jednocześnie z przepływem gazów, spalaniem, odparowywaniem czynnika chłodzącego jak również z przepływem ciepła i właściwościami mechanicznymi kompozytu będącego materiałem konstrukcyjnym komory spalania.

Zaprezentowane kompleksowe podejście Thermal FSI jest szczególnie istotne przy modelowaniu elementów aktywnie chłodzonych, takich jak komory spalania, których ściany znajdują się bezpośrednio przy przepływach ciepłych i zimnych czynników. Co więcej, dostosowanie węzłów siatki na granicy faz ciecz-ciało stałe znacznie przyspiesza zbieżność rozwiązania, dzięki czemu gęste i spójne siatki dają dokładniejsze i szybsze wyniki niż siatki zgrube i niespójne.

Rozważania zawarte w pracy mogą istotnie wpłynąć na rozwój turbin gazowych zasilanych wodorem.

8. Uwagi krytyczne i dyskusje

Po przeczytaniu i przeanalizowaniu rozprawy można sformułować kilka krytycznych uwag do pracy:

- Rysunek 1.2: nie wszystkie strumienie są opisane, brakuje też strumienia CO₂ będącego jednym z produktów spalania metanu w tlenie.
- Doktorat czasami posługuje się niewłaściwymi dla monografii zwrotami typu:
 - „This article is a part of the „Negative CO2 Power Plant”...” – strona 43,
 - „This article is focused on...” – strona 48,
 - „In this paper, separate solution of...” – strona 51.
- Doktorantowi zdarzyło się kilkakrotnie używać cytowań zagregowanych np. na stronach 88, 89, 90, 96.

Po analizie rozprawy mam następujące pytania do Doktoranta:

- Jaki Pana zdaniem wpływ na dokładność obliczeń modelu może mieć przyjęte przez Pana założenie ze strony 110 o pominięciu w modelu wyżłobień na końcach ścian komory spalania wykonanych z materiału WHIPOX (tzw. linera) (mających za zadanie lepsze dopasowanie się z uszczelką)? Proszę również wyjaśnienie powodów oraz przewidywanych przez Pana skutków zastosowania innych uproszczeń geometrii modelu przedstawionych w podrozdziale 4.1.2.
- Podrozdział 4.1.4: Z powodu nie osiągnięcia zbieżności w obliczeniach Doktorant zdecydował się na symulację wtrysku pary zamiast wody na powierzchnię zewnętrzną kompozytu CMC. Jaki zdaniem Doktoranta będzie miało to wpływ na dokładność obliczeń komory chłodzonej transpiracyjnie?

- Strona 126: W przypadku modelowania stanu nieustalonego dla uproszczenia obliczeń Doktorant użył dużego obciążenia ciśnieniem ścian komory spalania (tzw. linera) zamiast obciążenia cieplnego (które, jak sam Doktorant zauważył, w opisywanym przypadku komory spalania odgrywa większą rolę niż obciążenie ciśnieniem). Proszę uzasadnić to uproszczenie.
- Z pracy można wywnioskować, że model komory spalania chłodzonej transpiracyjnie (będącej przedmiotem rozprawy) nie został zwalidowany na rzeczywistym obiekcie. W podsumowaniu pracy zamieszczono zdjęcie wybudowanego prototypu modelowanego urządzenia. Czy w niedalekiej przyszłości planowana jest walidacja (na rzeczywistym obiekcie) modelu matematycznego przedstawionego przez Doktoranta? Jakie parametry modelu byłyby wówczas wzięte pod uwagę i w jaki sposób Doktorant zaplanowałby przebieg takich badań?

9. Uwagi redakcyjne

Pomimo tego, że rozprawa została spisana z dużą starannością możliwe jest wskazanie kilku uwag redakcyjnych:

- W pracy opisano szereg równań a także posługiwano się wieloma skrótami, dlatego przydatne byłoby dodanie wykazu skrótów i oznaczeń, którego w pracy zabrakło.
- Niektóre rysunki są zbyt małe a przez to trudne do odczytania: rys. 1.19, 2.17, 5.1, 5.8, 5.9, 5.10.
- W pracy doktorantowi zdarza się używać języka potocznego np. „the backbone of something”.
- W pracy występują powtórzenia tych samych wyrazów w jednym zdaniu.
- Na stronie 102, 105, 107, 153 i 155 Doktorant używa jednostki temperatury w „°K” – prawidłowo jest w „K” lub „°C”.
- Praca zawiera też pewną liczbę literówek. Nie mają one jednak znacznego wpływu na zrozumiałość i wartość merytoryczną pracy.

10. Ostateczna ocena pracy

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy mogę stwierdzić, że doktorant posiada ogólną wiedzę teoretyczną wymaganą od osoby ubiegającej się o stopień doktora w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Najdobitniej zaprezentowano to w rozdziale drugim, który był poświęcony rozważaniom teoretycznym na temat modelowania matematycznego (szczegóły opisano w punkcie piątym recenzji – teza i zakres rozprawy).

Analiza przedstawionej rozprawy prowadzi również do wniosku, że Doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Można to wywnioskować na podstawie tego, że Doktorant określił dokładną ścieżkę postępowania w celu udowodnienia podstawionej przez siebie hipotezy badawczej. Postępowanie to opierało się na dziewięciu krokach, które dokładnie opisano we wstępie rozprawy – tabela 1.1. Dzięki postępowaniu zgodnie z wyznaczoną wcześniej strategią działania Doktorant udowodnił postawioną przez siebie hipotezę badawczą.

Ponadto należy stwierdzić, że w rozprawie przedstawiono oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jakim jest zastosowanie metody Thermal FSI (ang. Fluid Solid Interaction) w procesie konstrukcyjnym komory spalania z chłodzeniem transpiracyjnym. Pozwoliło to na stworzenie modelu matematycznego tejże komory spalania, w którym wykorzystano jednocześnie obliczenia

CFD (do modelowania turbulencji, spalania, odparowania oraz przepływu przez materiał porowaty) oraz CSD (do modelowania elastycznego materiału izotropowego oraz ortotropowego kompozytu).

11. Wniosek końcowy

Mając na uwadze wymienione powyżej argumenty mogę stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Froissarta pt. „Modelling of cooling of thermally highly loaded components using Thermal FSI method” w pełni spełnia wymagania określone w Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, z późniejszymi zmianami.

Podkreślić należy, że rozprawa ta spełnia następujące kryteria:

- prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka,
- wskazuje na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,
- stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej.

Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

Dr hab. inż. Łukasz Szablowski