

Prof. dr hab. inż. Sławomir Dykas

Gliwice, 23-08-2024

Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Politechnika Śląska

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Marcina Froissarta pt. „Modelling of cooling of thermally highly loaded components using Thermal FSI method”, w postępowaniu o nadanie stopnia doktora mgr. inż. Marcinowi Froissartowi wszczętym 5 lutego 2024 r. w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna

Podstawą do wykonania recenzji jest decyzja Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szwalskiego PAN z dnia 4 lipca 2024 r. powołująca mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Marcina Froissarta pt. „Modelling of cooling of thermally highly loaded components using Thermal FSI method”.

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Marcina Froissarta pt. „Modelling of cooling of thermally highly loaded components using Thermal FSI method” dotyczy numerycznych analiz konstrukcyjnych i eksploatacyjnych elementów mokrej komory spalania. W pracy wykonano bardzo złożone analizy numeryczne zagadnień sprzężonych cieplno-przepływowych (CHT) oraz strukturalnych (FEM) elementów mokrej komory spalania. Do tego celu wykorzystano pakiet projektowania i analiz inżynierskich ANSYS. W pracy zawarto również elementy badań eksperymentalnych jak również analiz konstrukcyjnych samej komory spalania jak i jej elementów, przede wszystkim płaszcz wewnętrznego (tzw. liner).

Tematyka pracy jest bardzo aktualna, ponieważ spalanie alternatywnych paliw gazowych lub ciekłych w komorach spalania jest bardzo ważne w procesie transformacji energetycznej z jakim mamy obecnie do czynienia i jaki nas czeka w przyszłości. Stanowi konieczne uzupełnienie rozwijanych technologii energetycznych bazujących na użyciu odnawialnych źródeł energii. Poszukiwanie nowych rozwiązań i materiałów konstrukcyjnych w obszarze komór spalania i ich integracja z ekspanderami w układach silników cieplnych jest w związku

z tym konieczne i pożądane. W Zakładzie Konwersji Energii Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, kierowanego obecnie przez prof. Tomasza Ochrymiuka, prace w tym obszarze trwają od lat, a wyniki tych prac są znane zarówno w świecie naukowym jak i w przemyśle.

Większość badań przedstawionych w pracy przez Doktoranta zrealizowana została w ramach projektu badawczego "nCO2PP - Negative CO₂ emission gas power plant", którego założenie polega na zgazowaniu osadów ściekowych i spalaniu powstałego gazu syntezowego w mokrej komorze spalania zintegrowanej z ekspanderem.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska przygotowana została w języku angielskim. Na nieco ponad 180 stronach w sposób logiczny i przejrzysty zaprezentowano cele, metodykę oraz rezultaty przeprowadzonych analiz numerycznych oraz skromnych w stosunku do obliczeń numerycznych badań eksperymentalnych. Treść pracy podzielono na 6 głównych rozdziałów. Pierwszy rozdział to wstęp, gdzie przedstawiono motywację do podjęcia badań będących tematem pracy doktorskiej, cel i zakres zrealizowanych prac, dokonano wprowadzenia do konstrukcji komór spalania turbin gazowych oraz opisano kompozyt z matrycą ceramiczną *WHIPOX* zastosowany jako materiał konstrukcyjny głównego elementu analizowanej komory spalania.

W tym rozdziale doktorant sformułował hipotezę badawczą do potwierdzenia lub odrzucenia na podstawie przeprowadzonych badań. Doktorant poszukuje potwierdzenia istnienia zależności pomiędzy parametrami termiczno-mechanicznymi a strukturą materiału kompozytowego wysokoobciążonych elementów komór spalania turbin gazowych. Zależność ta powinna uwzględniać zarówno warunki pracy jak i trwałość analizowanego kompozytu.

Dla uzupełnienia Doktorant poszukuje odpowiedzi na trzy pytania:

- Jaki jest wpływ wysokiej temperatury na strukturę i własności mechaniczne ceramicznego płaszcza wewnętrznego komory spalania?
- Jak może wpływać proces odparowania wody i związana z tym różnica ciśnień na strukturę i własności mechaniczne kompozytu podczas obciążenia termicznego?
- Jaki jest związek między obciążeniem termo-mechanicznym a pogorszeniem właściwości konstrukcyjnych i mechanicznych?

W rozdziale drugim, najdłuższym, na 70 stronach Doktorant przedstawia dokładny opis technik modelowania jakie zastosował w swoich badaniach numerycznych, podczas gdy

walidację przyjętych modeli obliczeniowych oraz weryfikację przyjętych założeń przedstawiono w rozdziale trzecim tylko na 7 stronach.

W rozdziale czwartym Doktorant przedstawił model mokrej komory spalania, która jest przedmiotem większości przeprowadzonych i zaprezentowanych w pracy analiz numerycznych. Przedstawiono w nim model CAD komory spalania, przyjęte uproszczenia i założenia do analiz numerycznych CFD, FEM oraz sprzężonych analiz FSI. Przedstawiony został również model linera (płaszczka wewnętrznego komory spalania) z kompozytu *WHIPOX*, siatka numeryczna oraz analizy numeryczne. W kolejnym, piątym rozdziale zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych wyznaczania współczynnika rozszerzalności cieplnej dla linera wykonanego z kompozytu *WHIPOX* oraz szereg analiz numerycznych, cieplnych, wytrzymałościowych, przepływowych oraz sprzężonych. Rozdział ten wraz z rozdziałem czwartym stanowią podstawową część recenzowanej pracy doktorskiej.

Rozdział ostatni to podsumowanie, w którym doktorant uzasadnił słuszność przyjętej hipotezy badawczej na podstawie dokonanych analiz FSI oraz odpowiedział na postawione przez siebie trzy pytania.

Bibliografia zawiera 182 pozycje, z czego w 9ciu z nich autorem lub współautorem jest Doktorant.

2. Ocena rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Marcina Froissarta pt. „Modelling of cooling of thermally highly loaded components using Thermal FSI method” zawiera bardzo wiele analiz numerycznych przeprowadzonych przy wykorzystaniu nowoczesnego pakietu narzędzi do projektowania inżynierskiego ANSYS. Doktorant opanował i wykorzystał ten pakiet narzędzi numerycznych w wysokim stopniu. W przeprowadzonych analizach wykorzystał m.in. narzędzie ACP (ANSYS Composite Prep/Post) stworzone dla prostej i efektywnej definicji warstwowych kompozytów. Następnie wykorzystywał narzędzia do analiz wytrzymałościowych takie jak moduł ANSYS Mechanical APDL. W końcu do analiz przepływowych wykorzystał moduł CFD ANSYS Fluent. Ten zestaw narzędzi przy wykorzystaniu platformy ANSYS Workbench, która jest wspólna dla wszystkich modułów ANSYS pozwolił na prowadzenie bardzo złożonych analiz sprzężonych; przepływowych, cieplnych i wytrzymałościowych.

Doktorant w swojej rozprawie określił 9 zadań cząstkowych składających się na całość przeprowadzonych badań. Zbyt dużo moim zdaniem, co spowodowało, że kilka z tych zadań cząstkowych zostało przedstawione w pracy dość pobieżnie. Jednak ostatecznie rozprawa jest dobrze napisana, układ jest logiczny, postawione zadania badawcze dobrze opisane, a wnioski z przeprowadzonych badań wyczerpujące. Jak zwykle jednak, jest kilka rzeczy, moim zdaniem, które wymagałyby poprawy, m.in.:

- Brak na początku przeglądu literaturowego dotyczącego motywu przewodniego pracy doktorskiej, tj. modelowanie numerycznego sprzężonych zagadnień cieplno-przepływowych oraz analiz strukturalnych w odniesieniu do elementów komór spalania. Byłoby to pomocne w pozycjonowaniu przedstawionych w pracy badań numerycznych na tle innych prac o podobnej tematyce. Przedstawione przeglądy literaturowe w poszczególnych rozdziałach są pomocne, jednak odnoszą się tylko do stanu wiedzy w tematach omawianych w danych rozdziałach.
- W rozdziale drugim przedstawiono bardzo dokładny opis użytych przez doktoranta technik modelowania. Dokładne przedstawienie opisu matematycznego skutkowało zapisem 291 równań i zależności w tym rozdziale. Należało się skupić, moim zdaniem, tylko na tych zależnościach, w których doktorant wprowadzał własne autorskie zmiany czy modyfikacje. Przy tak obszernym opisie modeli numerycznych rzuca się w oczy brak spisu oznaczeń i symboli, który ułatwiłby czytanie oraz uporządkowałby używane symbole i oznaczenia. Bowiem takie same symbole stosowane są do różnych wielkości oraz te same wielkości oznaczane są w różnych podrozdziałach innymi symbolami. Przy tak obszernym opisie również łatwo jest o błędy w zapisie i opisie.
- Wiele rysunków i grafik prezentowanych w pracy są niedostatecznie opisane i o dość słabej rozdzielczości (zwłaszcza kolorowe grafiki). Często w celu identyfikacji oznaczenia na rysunku trzeba przeczytać cały rozdział. Utrudnia to m.in. identyfikację dokładnych informacji na temat warunków brzegowych przyjętych do obliczeń, w tym np. parametrów tlenu, paliwa, wody (ciśnienie, temperatura strumień) doprowadzanych do testowej komory spalania. Często rysunki znajdują się nie w tym podrozdziale, w którym jest odniesienie do nich w tekście.
- Przy prezentacji wyników obliczeń zdecydowano się w większości na wizualizację wybranych parametrów w postaci kolorowych map, z których ciężko jest określić

dokładną wartość w konkretnym obszarze lub punkcie. Przydałyby się dodatkowo rozkłady 1D wzdłuż charakterystycznych linii.

- Wyniki walidacji zastosowanych metod i modeli numerycznych na podstawie modelowania sprzężonego zagadnienia cieplno-przepływowego konwekcyjnie chłodzonej łopatką turbiny gazowej oraz analizy pola przepływu przez geometrie komory spalania wydają się dość skromne. Zwłaszcza, że nie przeprowadzono poszerzonej dyskusji otrzymanych wyników.

3. Uwagi i komentarze

Po lekturze pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Marcina Froissarta widać wyraźnie, że opanował on narzędzia projektowania inżynierskiego ANSYS w stopniu bardzo dobrym. Jednoczesne wykorzystywanie wielu modułów pakietu ANSYS do projektowania i analiz sprzężonych zasługuje na uznanie. Stworzony warsztat badawczy przez Doktoranta pozwolił na przeprowadzenie wielu analiz numerycznych przydatnych przy konstruowaniu i doborze elementów mokrych komór spalania zespołów turbin gazowych.

Prezentowane w pracy badania są bardzo obszerne, nie wszystko wydaje się dla czytającego jasne i oczywiste. Dlatego dla pełniejszego zrozumienia przeprowadzonych badań konieczne są dodatkowe wyjaśnienia:

- W konstrukcji mokrej komory spalania (WCC) zdecydowano się na bezpośrednie chłodzenie tzw. linera wodą od strony zewnętrznej. Czy rozważane było zastosowanie innego czynnika chłodzącego lub użycie materiału pośredniego pomiędzy kompozytem a chłodziwem?
- Czy próbowano określać udział wagowy pary na wylocie wody chłodzącej z linera (w kanale A' rys.4.1)?
- Proszę o szersze wyjaśnienie, dlaczego ostatecznie w obliczeniach numerycznych zdecydowano się na wtrysk pary zamiast wody? Czy analizowano wpływ zmiany strumienia wody wtryskiwanej do komory spalania na ciśnienia w komorze?
- Z uwagi na kłopoty z identyfikacją dokładnych warunków brzegowych i parametrów większości prezentowanych symulacji numerycznych prezentowanych w rozdziale 5 proszę o przykładowe warunki brzegowe i parametry symulacji procesu spalania modelem GRI-Mech 3.0 oraz modelem fazy dyskretniej (Discrete Phase Model) przeprowadzone przy użyciu modułu ANSYS Fluent.

- Trudności z identyfikacją warunków brzegowych pojawiają się też przy obliczeniach CFD, m.in. tych przedstawionych w rozdziale 5.7. Proszę o dodatkowe informacje na ten temat.
- Różnica pomiędzy maksymalną a średnią temperaturą na wylocie z analizowanej komory spalania wynosi ok. 800K. Czy można prosić o wykres profilu temperatury i prędkości na wylocie? Ma to znaczenie w przypadku ewentualnej integracji komór spalania z ekspanderem.

4. Wnioski końcowe

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Marcina Froissarta pt. „Modelling of cooling of thermally highly loaded components using Thermal FSI method” spełnia warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1688). Praca prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie oraz umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Uzyskane wyniki są oryginalne, wartościowe, a użyty warsztat badawczy prawidłowy i bardzo nowoczesny. Tym samym wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych PAN o dopuszczenie Pana mgr. inż. Marcina Froissarta do dalszych etapów w przewodzie doktorskim.

