

Recenzja rozprawy doktorskiej
Mgr inż. Marcina Froissarta
"Modelling of cooling of thermally highly loaded
components using Thermal FSI method"
Promotor rozprawy: dr hab. inż. Tomasz Ochrymiuk,
Profesor IMP PAN

Podstawą formalną opracowania recenzji jest prośba o wykonanie recenzji w postępowaniu o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych mgr inż. Marcina Froissarta w piśmie z dnia 16.07.2024 r.

A. OCENA TEMATYKI PODJĘTYCH BADAŃ

Zagadnienia podjęte w ocenianej rozprawie dotyczą rozwijania metod numerycznych do analiz złożonych zjawisk przepływowo-ciepłno-wytrzymałościowych. Metody te obok badań eksperymentalnych umożliwiają projektowanie nowych zaawansowanych urządzeń pozwalających na wyższą sprawność konwersji energii cieplnej na pracę mechaniczną. W celu podniesienia sprawności i trwałości turbiny gazowej zaproponowano wykorzystanie ceramicznego kompozytu (Ceramic Matrix Composite CMC). Materiał ten jest odporny na wysokie temperatury ale ma mniejszą kruchość od typowych materiałów ceramicznych. Zaledwie kilka firm na świecie dysponuje technologią potrzebną do produkcji tych materiałów. Jedną z nich jest Niemiecki Instytut Lotnictwa, który opracował materiał o nazwie WHIPOX. Elementem innowacyjnym przeprowadzonych badań jest wykorzystanie ceramicznej struktury porowatej do chłodzenia transpiracyjnego ciekłą wodą. Praca ta wpisuje się więc w cykl badań nad ograniczeniem wykorzystania paliw kopalnych i zmniejszeniem emisji gazów cieplarnianych. Podjęte badania są istotne ze względu na obowiązujące ograniczenia emisji CO₂ oraz sytuację geopolityczną w Europie. Wśród wielu opublikowanych prac na temat materiałów CMC, brakuje badań nad zachowaniem WHIPOXu w stanie mokrym. Podjęty temat badań należy więc uznać za ambitny i uzasadniony.

B. CHARAKTERYSTYKA PRACY

Recenzowana praca doktorska jest napisana w języku angielskim, liczy 181 stron i została podzielona na 6 rozdziałów. Rozpoczyna się od podziękowań, streszczeń w języku angielskim i polskim oraz spisu treści. Praca kończy się spisem wykorzystanej literatury.

W rozdziale pierwszym zamieszczono wprowadzenie z opisem głównych celów pracy oraz dziewięciu najważniejszych do zrealizowania zadań badawczych. Następnie opisano ceramiczny kompozyt Whipox i kilkanaście poświęconych mu publikacji. Pod koniec wprowadzenia przedstawiono kilka rozwiązań konstrukcyjnych komór spalania z powołaniem na kilka opublikowanych prac.

Rozdział drugi zawiera szeroki opis zastosowanych technik modelowania. Autor zadał sobie dużo trudu aby opisać metody numeryczne dla obszaru zajmowanego przez płyn, ciało stałe oraz metodę uwzględniającą interakcję płyn – struktura (FSI – Fluid Structure Interaction). Na uwagę zasługuje opis zagadnień, które później są wykorzystane w pracy takich jak: modelowanie turbulencji, spalania, odparowania, przepływu przez materiał porowaty, modelowanie elastycznego materiału izotropowego, ortotropowego kompozytu oraz kryterium zniszczenia Tsai – Wu.

Rozdział trzeci poświęcony jest weryfikacji eksperymentalnej wybranych opracowanych modeli numerycznych. Wykorzystano wyniki badań doświadczalnych, które są dostępne w literaturze światowej. Pierwszą weryfikację przeprowadzono dla ścianki łopatki kierowniczej NASA C3X. Po przetestowaniu kilku modeli turbulencji, wyniki najbliższe danym pomiarowym dał model $k-\omega$ SST. Druga weryfikacja jest pokazana dla trójwymiarowej geometrii komory spalania Tay, przez którą płynie zimne powietrze. Obliczony profil prędkości w przekroju kontrolnym jest bliski wynikom eksperymentalnym.

Opis geometrii oraz przyjętych warunków początkowo-brzegowych dla opracowanego trójwymiarowego modelu mokrej komory spalania turbiny gazowej przedstawiono w rozdziale czwartym. W modelu analizowano spalanie metanu w czystym tlenie, odparowanie kropel wody wewnątrz płomienia i chłodzenie transpiracyjne. Trójwymiarowy model strukturalny linera wykonano z kompozytowej ceramiki Whipox umożliwiając w nim analizę różnych kątów splotu włókien.

Zmierzony współczynnik rozszerzalności cieplnej dla kompozytowej ceramiki Whipox przedstawiono na początku rozdziału piątego. Badania te przeprowadzono w laboratorium Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk. W dalszej części tego rozdziału opisano wyniki z symulacji numerycznych dla opracowanych modeli mokrej komory spalania turbiny gazowej. Wybór finalnej geometrii komory spalania został dokonany w oparciu o szereg modeli parametrycznych, mających na celu maksymalizację efektywności mieszania i ujednolicenie wylotowego profilu temperaturowego. Strukturalne analizy linera komory spalania pozwoliły na wybór kąta splotu włókien o wartości 75° , dla którego współczynnik Tsai – Wu przyjął najniższą wartość.

Podsumowanie wyników badań, a także wnioski końcowe zawiera rozdział szósty. Główny cel doktoratu, którym było opracowanie trójwymiarowego modelu mokrej komory spalania turbiny gazowej został zrealizowany. Zastosowanie modelu spalania GRI-Mech 3.0 pozwoliło na analizę złożonych reakcji chemicznych zachodzących wewnątrz komory spalania. Intensywne mieszanie metanu z tlenem uzyskano poprzez zastosowanie trzech zawirowaczy. Aby zamodelować materiał WHIPOX, wprowadzono włókna naprzemiennie pod kątem plus lub minus theta. Definicja materiału ortotropowego CMC wymagała wartości trzech modułów Younga, trzech modułów ścinania i trzech współczynników Poissona. Dodatkowo moduły

Younga wprowadzono jako zależne od pochodnej naprężenia obwodowego po czasie. Dzięki temu właściwości mokrego porowatego materiału CMC zmieniają się w przypadku przyłożenia szybkiego obciążenia zewnętrznego, takiego jak uderzenie lub wibracje. Zapobiega to powstaniu przenoszenia naprężeń od płynu na ścianki porów w symulacji gdy w rzeczywistości płyn już powinien opuścić pory. Zbudowanie i przeanalizowanie modelu Thermal FSI zawierającego w sobie domeny płynu i ciała stałego to najważniejszy element przeprowadzonych badań. Dzięki takiemu podejściu wszystkie zjawiska fizyczne są ze sobą sprzęgnięte. Opracowany model numeryczny pozwolił na zbudowanie prototypu mokrej komory spalania.

C. UWAGI DYSKUSYJNE

Pytania do pracy:

- 1) Cel pracy powinien wynikać z kompleksowo przeprowadzonego przeglądu literatury. Stan wiedzy na moment rozpoczęcia pracy doktorskiej lepiej byłoby przedstawić na początku pracy a nie w poszczególnych rozdziałach.
- 2) Weryfikacja eksperymentalna dla budowanych modeli numerycznych jest ważna. Tymczasem w rozdział trzeci jest przedstawiony bardzo skrótowo. Szczegółowy opis modelu numerycznego z rozdziału 3.1 można znaleźć w cytowanej publikacji [179]. Niestety brakuje opisu modelu numerycznego z rozdziału 3.2.
- 3) Weryfikacja eksperymentalna w rozdziale 3.1 przedstawia bardzo dobrą zgodność rozkładu ciśnień wzdłuż analizowanej łopatkii kierowniczej NASA C3X natomiast pojawiają się różnice w rozkładzie temperatur. Czy analizowano rozkład prędkości? W pracy doktorskiej oraz w cytowanej pracy [179] nie udało się tego znaleźć.
- 4) W rozdziale 4.2.3 napisano, że właściwe modelowanie kontaktu między elementami jest kluczowe gdy są one wykonane z różnych materiałów. Czy analizowano inny kontakt niż beztarciowy? Czy wprowadzano kontaktowy opór cieplny?
- 5) Opis modelu numerycznego do analizy złożonych reakcji chemicznych zachodzących wewnątrz komory spalania w rozdziale 4 oraz uzyskane wyniki w rozdziale 5.7 są przedstawione bardzo skrótowo. Być może więcej informacji znajduje się w cytowanej pracy [184], do której niestety nie miałem dostępu.
- 6) Jeden ze sformułowanych wniosków „Dzięki sprzężeniu procesu spalania z modelem DPM (Discrete Particle Modelling) stwierdzono, że szybko wrzące kropelki wody powodują lokalne oscylacje ciśnienia, co znacznie poprawia intensywność mieszania w płomieniu.” wydaje się nie wynikać z treści ocenianej pracy.
- 7) W recenzowanej pracy brakuje opisu przeprowadzonych badań eksperymentalnych, których wyniki przedstawiono w rozdziale 5.1.
- 8) Porównanie rozkładu temperatury na ścianie linera pomiędzy modelami CFD a Thermal FSI wskazuje na znaczne różnice pomiędzy podejściem rozłącznym (CSD plus CFD) a zintegrowanym (Thermal FSI). Czy zbudowany prototyp urządzenia pozwolił na sprawdzenie czy faktycznie model zintegrowany (Thermal FSI) jest dokładniejszy?

Uwagi redakcyjne:

- a) brak oznaczenia osi X w rozdziale 3.1
- b) wprowadzenie jednostek dla zmiennych w równaniu (4.1) poprawiłoby czytelność pracy.
- c) błędne cytowanie rysunku 5.2 w rozdziale 5.1.
- d) tytuł rozdziału 5.2 chyba powinien brzmieć „Liner results – steady state”?
- e) jeśli zewnętrzne ciśnienie wynosi 3 MPa a wewnętrzne 1 MPa to różnica ciśnień powinna być 2 MPa – strona 133.
- f) Rysunki 5.8 do 5.11 powinny być większe aby można było odczytać wartości liczbowe.

D. OCENA KOŃCOWA

W recenzowanej rozprawie Doktorant podejmuje ambitny temat opracowania trójwymiarowego modelu mokrej komory spalania turbiny gazowej. W tym celu przeprowadził On szerokie badania numeryczne obejmujące analizę spalania metanu w czystym tlenie, odparowanie kropel wody wewnątrz płomienia, chłodzenie transpiracyjne, trójwymiarowe modelowanie porowatej struktury linera. Przedstawiono analizy ustalone i nieustalone, podejście rozłączne (CSD plus CFD) i zintegrowane (Thermal FSI). Opracowane modele numeryczne pozwoliły na wybór kąta splotu włókien o wartości 75° , dla którego współczynnik Tsai – Wu przyjął najniższą wartość. Dodatkowo przeprowadzono weryfikacje wybranych modeli numerycznych przy wykorzystaniu wyników z badań doświadczalnych, które są dostępne w literaturze. Przeprowadzono pomiary współczynnika rozszerzalności cieplnej dla kompozytowej ceramiki Whipox. Zbudowanie i przeanalizowanie modelu Thermal FSI zawierającego w sobie domeny płynu i ciała stałego to najważniejszy element przeprowadzonych badań.

Pomimo zamieszczonych uwag merytorycznych Doktorantowi udało się wyciągnąć z wykonanych badań wnioski pozwalające na zbudowanie prototypu mokrej komory spalania, której zdjęcie przedstawiono w ostatnim rozdziale pracy. Mgr inż. Marcin Froissart w ocenianej rozprawie wykazał się szeroką wiedzą, umiejętnością wnioskowania i profesjonalizmem w zakresie analiz przepływowo-cieplno-wytrzymałościowych oraz znajomością nowoczesnych metod i programów numerycznych.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że przedstawiona praca Pana Marcina Froissarta pt. „Modelling of cooling of thermally highly loaded components using Thermal FSI method” spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" z 20 lipca 2018 roku. Powinna więc być dopuszczona przez Radę Naukową Instytutu Maszyn Przepływowych PAN do dalszego postępowania w celu nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.