

STRESZCZENIE

Rozwój cywilizacyjny człowieka w ciągu ostatniego wieku znacznie przyspieszył za sprawą masowego wykorzystania paliw kopalnych. Bardzo tanie źródła energii w postaci węgla i ropy naftowej doprowadziły do polepszenia jakości życia ludzi na całym świecie, jednak skutkiem ubocznym spalania jest intensywna emisja gazów cieplarnianych. Biorąc pod uwagę, że te zasoby energetyczne są ograniczone, należy jak najszybciej ograniczyć ich zużycie i przestawić się na źródła energii odnawialnej. Proces ten jest bardzo kosztowny, lecz konieczny, aby uniknąć scenariusza nagłego wyczerpania zasobów energetycznych w szczytowym rozwoju cywilizacyjnym.

Badania przedstawione w tej rozprawie są częścią projektu badawczego "nCO₂PP - Negative CO₂ emission gas power plant", którego założenie polega na zgazowaniu osadów ściekowych i spalaniu gazu syntetycznego w mokrej komorze spalania napędzającej turbinę. Zaletą takiego rozwiązania jest utylizacja niebezpiecznych odpadów, produkcja energii elektrycznej oraz sekwestracja i zmagazynowanie dwutlenku węgla zawartego początkowo w ściekach.

Zwiększenie wydajności silników cieplnych jest równie ważne jak zrównoważona gospodarka źródłami energii. Zgodnie z opisem termodynamicznym obiegu porównawczego turbiny gazowej (obieg Braytona), wzrost temperatury wlotowej poprawia sprawność obiegu prowadząc do oszczędności paliwa. Z drugiej strony wysokość temperatury wlotowej jest ograniczona wytrzymałością oraz żywotnością komponentów turbinowych. Zastosowana metoda Thermal FSI idealnie nadaje się do obliczeń aktywnie chłodzonych elementów turbin gazowych, gdyż pozwala na dokładne wyznaczenie temperatury pracy struktury. Dla porównania metoda oddzielnych analiz CFD i CSD jest mniej dokładna, co skutkuje potrzebą wprowadzenia wyższych marginesów bezpieczeństwa i obniżeniu znamionowej temperatury pracy silników cieplnych.

Hipoteza badawcza brzmi: "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".

Zadanie postawione w rozprawie jest oryginalne i stanowi ważny krok w ulepszeniu procesu konstrukcyjnego. Hipotezę badawczą sprawdzono przy pomocy metody Thermal FSI (termiczne sprzężenie płynu z ciałem stałym), która pozwala na zamodelowanie przepływu ciepła pomiędzy płynem a ciałem stałym w ramach jednego modelu o spójnej siatce. Dzięki temu zmiana temperatury warstwy przyściennej wpływa na właściwości ciała stałego, a zmiana temperatury ciała stałego wpływa na parametry warstwy przyściennej. Kolejnym elementem sprawdzenia hipotezy badawczej było zastosowanie modelu procesu spalania GRI-Mech 3.0 oraz modelu DPM, który pozwala na odparowanie fazy dyskretniej (kropli wody) wewnątrz fazy ciągłej. Od strony ciała stałego, niezwykle ważne było zamodelowanie kompozytowej struktury wewnętrznej lineru, które pozwoliło na zastosowanie kryterium oszacowania zniszczenia Tsai-Wu.

Zaprezentowane kompleksowe podejście Thermal FSI jest szczególnie ważne podczas modelowania aktywnie chłodzonych elementów takich jak komora spalania, gdzie ścianka sąsiaduje bezpośrednio z gorącym i zimnym przepływem. Ponadto został potwierdzony fakt, że dopasowanie węzłów siatki na granicy płynu i ciała stałego znacznie ułatwia zbieżność analizy, więc zagęszczona i zarazem spójna siatka daje dokładniejsze i szybsze

rozwiązanie od zgrubnej i niespójnej.

Szczególnie ważnym etapem rozwoju modelu było określenie współczynnika rozszerzalności cieplnej materiału CMC (ceramiczny kompozyt) przy pomocy eksperymentu. Jest to kluczowy parametr pozwalający na prawidłowe odwzorowanie naprężeń termicznych, które dominują w konstrukcjach intensywnie podgrzewanych i chłodzonych. Ze względu na skomplikowaną strukturę wewnętrzną linera wykonanego z ceramicznego kompozytu, zaobserwowano nieliniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej. Jest to spowodowane tym, że ciepło szybciej się rozchodzi wzdłuż jednolitych włókien niż w poprzek materiału porowatego. Poza tym, słaby kontakt pomiędzy włóknem a porowatym wypełnieniem może ulec odklejeniu, co jeszcze bardziej komplikuje zagadnienie rozszerzalności cieplnej.

Końcowym wynikiem analizy Thermal FSI jest rozkład współczynnika Tsai-Wu w domenie linera zbudowanego z materiału CMC. Rejon leżący najbliżej płomienia ma najwyższy współczynnik Tsai-Wu przekraczający jeden. Oznacza to, że według tego kryterium pewne rejony linera mogą ulec uszkodzeniu, co nie dyskwalifikuje eksperymentu. Należy wziąć pod uwagę, że przedstawione obliczenia opisują konstrukcję prototypową, więc na pewnym etapie procesu konstrukcyjnego nastąpi weryfikacja założeń projektowych. Obliczenia komory spalania dla wysokoobciążonych punktów pracy mają kluczowe znaczenie z termodynamicznego oraz ekonomicznego punktu widzenia.

Szczegółowy opis geometrii modelu Thermal FSI, jego warunków brzegowych oraz wyników został uzupełniony przez głębokie i szerokie studium modeli matematycznych. Od strony analizy CFD (Computational Fluid Dynamics) jest to modelowanie turbulencji, spalania, odparowania oraz przepływu przez materiał porowaty. Od strony CSD (Computational Solid Dynamics) jest to modelowanie elastycznego materiału izotropowego oraz ortotropowego kompozytu. Podejście Thermal FSI integruje analizę CFD oraz CSD w ramach jednego modelu.

Należy podkreślić, że materiał CMC (ceramiczny kompozyt) jest odpowiedzią instytutów badawczych na potrzebę stworzenia materiału odpornego na wysokie temperatury tak jak jednolita ceramika, ale pozbawionego jej głównej wady jaką jest kruchość. CMC znajduje zastosowanie głównie w przemyśle lotniczym i kosmicznym, ale używa się jego także w innych gałęziach przemysłu. Zaledwie kilka firm na świecie dysponuje technologią potrzebną do produkcji komponentów CMC, więc dane eksperymentalne dostępne w przestrzeni publicznej są mocno ograniczone. WHIPOX jest nazwą komercyjną materiału CMC opracowanego przez Niemiecki Instytut Lotnictwa. Jego porowata struktura została zaprojektowana z myślą o ograniczeniu kruchości w ekstremalnych temperaturach, więc dostępne publikacje pomijają zachowanie WHIPOXu w stanie mokrym. Elementem innowacyjnym przeprowadzonych badań jest wykorzystanie ceramicznej struktury porowatej do chłodzenia transpiracyjnego ciekłą wodą. Jest to zastosowanie obecne w literaturze, która jednak bardziej koncentruje się na intensyfikacji mieszania paliwa z utleniaczem i zapewnieniu stabilności płomienia. Innym ważnym tematem dostępnym w literaturze jest wydajność chłodzenia elementów silników cieplnych przy pomocy filmów chłodzących.

Przegląd literatury został zaprezentowany w poszczególnych rozdziałach. Poniższa rozprawa składa się z dziewięciu głównych kroków, które zostały wykonane w celu sprawdzenia hipotezy badawczej. Są one wyszczególnione poniżej.

1. Weryfikacja metod badawczych polegająca na zbudowaniu modelu Thermal FSI i porównaniu wyników względem pomiarów. Pierwszy użyty model jest oparty na trójwymiarowej geometrii komory spalania Tay, przez którą płynie zimne powietrze. Obliczony profil prędkości w przekroju kontrolnym jest bliski wynikom eksperymentalnym, co stanowi pozytywną weryfikację. Drugi model został zweryfikowany na podstawie rozkładu ciśnienia i temperatury na ścianie łopatkii kierowniczej NASA

C3X. Po porównaniu szeregu modeli turbulencji, najdokładniejsze wyniki dał model $k-\omega$ SST, który to został użyty w późniejszych krokach analizy Thermal FSI (rozdział 3).

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. Ze względu na cykliczność geometrii, została ona zredukowana do sektora o kącie 120°. Wybór geometrii komory spalania został dokonany w oparciu o szereg modeli parametrycznych, mających na celu maksymalizację efektywności mieszania i ujednolicenie wylotowego profilu temperaturowego (rozdział 5.7).
3. Budowa trójwymiarowego modelu CSD linera zrobionego z kompozytowej ceramiki jest kluczowym elementem pozwalającym na późniejsze określenie stopnia zniszczenia linera. Analizy stacjonarne i niestacjonarne pozwoliły na optymalizację kąta splotu włókien oraz potwierdziły skuteczność modelu (rozdziały 5.2-5.4).
4. Eksperymentalne wyznaczenie współczynnika rozszerzalności cieplnej materiału CMC w laboratorium Instytutu Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk. Ten parametr ma kluczowe znaczenie w określeniu stopnia naprężenia linera, ponieważ jest on jednocześnie poddawany intensywnemu nagrzewaniu oraz gwałtownemu chłodzeniu. Eksperyment potwierdził, że współczynnik rozszerzalności cieplnej może być przybliżony dwoma stałymi wartościami - poniżej i powyżej temperatury 100°C (rozdział 5.1).
5. Zbudowanie i przeanalizowanie złożeniowego modelu CSD w stanie stacjonarnym i niestacjonarnym. W tym przypadku temperaturowe warunki brzegowe zostały zadane arbitralnie, aby przeanalizować i przygotować złożenie do modelowania przy pomocy metody Thermal FSI (rozdziały 5.5-5.6).
6. 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, więc oddziałują na siebie w każdym numerycznym kroku prowadzącym do rozwiązania (rozdział 5.8).
7. Porównanie rozkładu temperatury na ścianie linera pomiędzy modelami CFD a Thermal FSI wskazuje, że są zauważalne znaczne różnice pomiędzy podejściem rozłącznym (CSD plus CFD), a zintegrowanym (Thermal FSI). Przyczyną jest zachowanie płynu przy ścianie, który w metodzie zintegrowanej jest termicznie sprzęgnięty ze ścianką (rozdział 5.9).
8. Określenie trwałości linera wykonanego z ceramiki kompozytowej (CMC) przy pomocy hipotezy wytrzymałościowej Tsai-Wu. Wyniki tej analizy mają bezpośrednie zastosowanie to określenia trwałości prototypu. Należy jednak zaznaczyć, że im bardziej skomplikowany model numeryczny, tym większa niepewność związana z otrzymanymi wynikami (rozdział 5.8).
9. Zaproponowanie modyfikacji metody obliczeniowej, która bierze pod uwagę zmianę właściwości mechanicznych porowatego linera, gdy jest on wypełniony nieściśliwym płynem. W takim przypadku liner staje się sztywniejszy pod wpływem gwałtownych zmian obciążeń, gdyż płyn wypełniający pory nie zdąży wypłynąć w krótkim czasie przenosząc część obciążenia hydrostatycznego (rozdział 5.10).