

Prof. dr hab. inż. Wojciech Sobieski
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski
Wydział Nauk Technicznych
Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
10-957 Olsztyn, ul. M. Oczapowskiego 11
e-mail: wojciech.sobieski@uwm.edu.pl
tel.: (89) 5-23-32-40 / fax: (89) 5-23-32-55

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Bartosza Kraszewskiego pt.:
„Capturing rapid nonlinear phenomena using coupled thermal fluid-solid
interaction numerical analysis”.**

Podstawą prawną wykonania recenzji jest Umowa o Dzieło nr 18.11/0/2.

1. Tytuł rozprawy doktorskiej stanowiącej podstawę ubiegania się w aktualnym postępowaniu o nadanie stopnia doktora.

Podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia doktora w aktualnym postępowaniu jest rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Bartosza Kraszewskiego zatytułowana „Capturing rapid nonlinear phenomena using coupled thermal fluid-solid interaction numerical analysis”. Promotorem rozprawy jest Prof. dr hab. inż. Janusz Badur. Zawartość rozprawy jest adekwatna do jej tytułu.

2. Ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Bartosza Kraszewskiego pt. „Capturing rapid nonlinear phenomena using coupled thermal fluid-solid interaction numerical analysis” obejmuje łącznie 68 stron tekstu, przy czym treść zasadnicza zajmuje 50 stron, a pozostałe strony to dedykacje, streszczenie, spis treści, wykaz symboli i skrótów, spis literatury, spis rysunków i tabel, wykaz bibliograficzny oraz 1 załącznik. Treść zasadnicza podzielona jest na 6 rozdziałów. Zwraca uwagę staranność, estetyka oraz profesjonalizm przygotowania rozprawy: treść w języku angielskim i skład w środowisku TeX.

Rozdział 1 zawiera motywację, cel oraz zakres pracy. Autor podkreśla, powołując się na 13 pozycji bibliograficznych, znaczenie wysokiej jakości projektowania układów technicznych w kontekście energetyki cieplnej, lotnictwa oraz lotów kosmicznych. Zauważa, że w tych branżach zakresy parametrów pracy różnych urządzeń są szczególnie szerokie, co stwarza różnorodne wyzwania, w tym te związane z numerycznym modelowaniem interakcji między ciałami stałymi a płynami. Autor wskazuje, że stopień zaawansowania zintegrowanych modeli jest relatywnie niski, mimo ogólnie

wysokiego poziomu wiedzy i możliwości w dziedzinach CFD (Computational Fluid Dynamics) i CSD (Computational Solid Dynamics). Rozważa również, jakie cechy powinien posiadać przypadek testowy, który umożliwi analizowanie możliwości oraz określenie zalet i wad dostępnych modeli integrujących termo-mechanikę ciał stałych z termo-mechaniką płynów. Autor wskazuje taki przypadek i formułuje dwa główne cele badawcze. W końcowej części rozdziału, Autor przedstawia zarys kolejnych rozdziałów rozprawy.

Rozdział 2 przedstawia rys historyczny oraz przegląd literatury (łącznie cytowanych jest 30 pozycji) dotyczący wybranych zagadnień i przykładów związanych z modelowaniem interakcji między ciałami stałymi a płynami. W pierwszej części rozdziału Autor koncentruje się na problematyce wymiany pędu (Momentum-FSI), natomiast w drugiej rozszerza analizę o aspekty termiczne (Thermal-FSI). W rozdziale zwrócono również uwagę na doświadczenie zespołu badawczego oraz dorobek jednostki, w której Autor realizował swoje badania.

Rozdział 3 przedstawia, powołując się na 7 pozycji bibliograficznych, fizyczno-matematyczne podstawy modelowania interakcji między ciałami stałymi a płynami. Autor opisuje ogólną koncepcję, a następnie w dwóch kolejnych podrozdziałach szczegółowo omawia modele zachowawcze płynów (w ujęciu Metody Objętości Skończonych) oraz ciał stałych (w ujęciu Metody Elementów Skończonych), zapisując je w jednolitej formie matematycznej. Takie podejście podkreśla ogólne podobieństwo zachowań obu tych rodzajów materii i ułatwia zrozumienie powiązań między zastosowanymi metodami numerycznymi. W końcowej części rozdziału Autor przedstawia ogólną koncepcję implementacji modelu Thermal-FSI w pakiecie ANSYS.

Rozdział 4 opisuje eksperyment przeprowadzony na obiekcie o cechach zdefiniowanych w Rozdziale 1. W poszczególnych sekcjach Autor omawia stanowisko laboratoryjne, aparaturę pomiarową, metodykę wykonywania pomiarów oraz uzyskane wyniki, przedstawione w formie wykresów temperatury i przemieszczenia w wybranych punktach układu. Dodatkowo, Autor prezentuje zdjęcia układu, ilustrujące kluczowe fazy procesu. W rozdziale 4 Autor nie korzysta ze źródeł bibliograficznych.

Rozdział 5, stanowiący kluczowy element rozprawy, prezentuje opracowany przez Autora model symulacyjny, integrujący w jedną całość solver CFD (moduł ANSYS Fluent) oraz CSD (moduł ANSYS Mechanical). W kolejnych sekcjach omówiono geometrię układu, dyskretyzację przestrzeni płynu i ciała stałego, zdefiniowane materiały, ustawienia solverów, a także warunki brzegowe i początkowe symulacji. Następnie przedstawiono porównanie ogólnego zachowania płynu i ciała stałego z wynikami eksperymentu oraz szczegółowe rezultaty, w tym wykresy temperatur oraz wykresy przemieszczeń w charakterystycznych punktach układu. Dyskusję uzupełniono analizą porównawczą wyników uzyskanych z dwóch alternatywnych metod numerycznych: Conjugate Heat Transfer oraz Thermal Structural. W rozdziale 5 Autor nie korzysta ze źródeł bibliograficznych.

Rozdział 6 stanowi podsumowanie rozprawy. Autor przypomina zakres przeprowadzonych badań, opisuje wykonane prace oraz zastosowane metody. Następnie formułuje szereg wniosków, spostrzeżeń i uwag końcowych.

3. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

Praca zawiera 50 pozycji bibliograficznych, co jest stosunkowo niewielką liczbą jak na rozprawy doktorskie w inżynierii mechanicznej. Szczególną uwagę zwraca fakt, że w części dotyczącej podstaw teoretycznych (Rozdział 3) pojawia się jedynie 7 pozycji bibliograficznych. W Rozdziale 4 (opracowanie eksperymentu) i Rozdziale 5 (model symulacyjny) Autor nie odnosi się do literatury ani nie uzasadnia swoich wyborów w oparciu o informacje zawarte w innych publikacjach, co w pracach naukowych stanowi powszechną praktykę.

Jakość materiałów cytowanych w bibliografii jest wysoka i nie budzi zastrzeżeń. Obecność źródeł z ostatnich lat wskazuje na aktualność podjętych badań. Opis bibliografii przypomina tzw. standard Vancouver, chociaż występują pewne odstępstwa, takie jak użycie cudzysłowów przy tytułach czy brak kursywy dla nazw czasopism. Odstępstwa te nie wpływają jednak na czytelność spisu.

4. Wskazanie oraz ocena celu pracy kandydata

Autor wskazał dwa cele badań:

1. określenie, czy współczesne komercyjne narzędzia numeryczne są odpowiednie do symulacji szybkich, nieliniowych zjawisk termicznych za pomocą metodologii Thermal-FSI na potrzeby przemysłowe;
2. porównanie oraz wykazanie zalet i wad metody Thermal-FSI w porównaniu z metodami Thermal Structural oraz Conjugated Heat Transfer.

O ile cel drugi nie budzi wątpliwości, to cel pierwszy jest dyskusyjny (szczegóły w punkcie 7 recenzji).

5. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Badania w rozprawie przedstawiono i omówiono profesjonalnie. Język jest klarowny, a wątki logicznie uporządkowane i przedstawione w przystępny sposób. W Rozdziale 5, poświęconym omówieniu wyników, szczegółowo opisano kolejne etapy pracy, ukazując powiązania między modelem symulacyjnym a eksperymentem. Wyjaśniono zarówno celowość, jak i sposób realizacji poszczególnych zadań, co świadczy o przemyślanej realizacji. Rysunki 5.9 i 5.10 mają jednak niską jakość, co może utrudniać ich pełną analizę.

Biorąc pod uwagę cele badań – szczególnie cel drugi – kluczowe znaczenie mają rysunki 5.13, 5.14 i 5.15. Ostatni z nich stanowi graficzne podsumowanie pracy. Autor wykazuje, że pomimo pewnych podobieństw w wynikach, jedynie podejście Thermal-FSI uchwyciło charakterystyczne zachowanie badanego układu. Uzyskana zgodność jakościowa, choć niepełna ilościowo, jest satysfakcjonująca i podkreśla przewagę hybrydowego modelowania, łączącego różne metody numeryczne dedykowane odmiennym zastosowaniom.

6. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników

Opracowanie praktycznych wskazówek ułatwiających modelowanie zagadnień z zakresu Thermal-FSI mogłoby przyczynić się do popularyzacji tej metody, wspierając rozwój oraz komercyjne wykorzystanie technik symulacyjnych.

7. Informacje o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie doktorskiej

Rozprawa stanowi zwartą całość i w sposób zrozumiały prezentuje przeprowadzone badania, szczególnie jeśli odbiorcą jest specjalista z tego obszaru badawczego. Mimo to można wskazać kilka elementów, które mogłyby zostać rozwinięte lub dopracowane.

W pracy brakuje wyjaśnienia, czym są wspomniane w tytule rozprawy szybkie zjawiska nieliniowe. W treści można by oczekiwać wyjaśnienia tego pojęcia, klasyfikacji takich zjawisk, przykładów oraz umiejscowienia problematyki termicznie stymulowanego wyboczenia w kontekście tej klasyfikacji. Rozdział 2, będący przeglądem literatury, skupia się głównie na integracji analiz CFD i CSD, co odpowiada drugiej części tytułu rozprawy, ale mniej uwagi poświęca samym zjawiskom wspomnianym w pierwszej części tytułu. Kluczowe dla tematu pracy słowa „rapid” czy „buckling” nie pojawiają się w Rozdziale 2 ani razu. Słowo „nonlinear” pojawia się tam raz.

W rozprawie brakuje przedstawienia przykładów, w których zjawisko termicznie stymulowanego wyboczenia odgrywa kluczową rolę. W streszczeniu Autor pisze, że „dla tego celu wybrano otwarty cienkościenny zbiornik po wstępnej selekcji”. Warto byłoby jednak przedstawić zbiór przypadków, z którego wybrano ten przykład, oraz źródła tej wiedzy. W sekcji 1.1 Autor wspomina, że wcześniej przeprowadził szereg wstępnych analiz numerycznych oraz testów eksperymentalnych, które nie spełniły oczekiwań. Rozszerzenie pracy o opis tego etapu mogłoby lepiej ukazać skalę wysiłku badawczego oraz zdobyte doświadczenie, które pozwoliło wybrać docelowy model.

Cel nr 1 wzbudza pewne wątpliwości. Autor nie przedstawił przeglądu literatury dotyczącego symulacji szybkich, nieliniowych zjawisk termicznych za pomocą metodologii Thermal-FSI. Zasadniczo realizacja celu 1 mogłaby ograniczyć się do analizy literatury w poszukiwaniu przykładów zastosowania komercyjnych narzędzi, odpowiadających wybranej przez Autora klasie zagadnień. Ponadto narzędzia, takie jak ANSYS, są komercyjnie dostępne i rozwijane, co sugeruje, że mogły już być testowane w podobnych zastosowaniach. Brakuje kontekstu literaturowego, który pozwoliłby odpowiedzieć na dwa podstawowe dla czytelnika pytania:

- Czy zastosowana przez Autora konfiguracja modeli i technik (Metoda Objętości Skończonych w wersji Volume of Fluid + Metoda Elementów Skończonych + dwustronna interakcja + analiza termiczna + siatki dynamiczne + skrypty APDL) była kiedykolwiek wykorzystywana, a jeśli tak, to w jakich zagadnieniach?
- Czy zjawisko będące tematyką rozprawy było już modelowane numerycznie w jakikolwiek sposób, a jeśli tak, to w jaki?

W rozprawie brakuje dyskusji na temat tego, jakie cechy powinien mieć model symulacyjny, aby mógł być uznany za przydatny w zastosowaniach przemysłowych, oraz czy model Autora takie cechy posiada. W Rozdziale 6, będącym podsumowaniem rozprawy, nie ma odniesień do tego wątku. Wydaje się zatem, że ten aspekt celu pierwszego nie został zrealizowany.

Autor założył, że zastosowane przez niego narzędzia symulacyjne są powszechnie znane, dlatego nie uznał za konieczne przedstawienia ich charakterystyki, zakresu zastosowań ani innych szczegółowych informacji. Warto jednak zauważyć, że prezentowane badania znajdują się na styku termo-mechaniki płynów i termo-mechaniki ciał stałych. Jak już wspomniano, większość badaczy specjalizuje się zazwyczaj w jednej z tych dziedzin. W związku z tym ich wiedza na temat drugiej może być ograniczona, co może prowadzić do trudności w pełnym zrozumieniu niektórych aspektów pracy. W tym kontekście wskazane byłoby przeprowadzenie przeglądu wybranych modułów pakietu ANSYS, które mogą być użyteczne – samodzielnie lub w połączeniu – do realizacji celów rozprawy. W szczególności, w pracy zabrakło bardziej szczegółowego omówienia podejść określanych przez autora jako Conjugated Heat Transfer oraz Thermal Structural.

Przedstawione powyżej kwestie nie mają istotnego wpływu na jakość rozprawy. Autor wyraźnie skoncentrował się na głównym nurcie badań, świadomie pomijając mniej istotne wątki. Założono, że czytelnik zainteresowany treścią rozprawy dysponuje odpowiednimi podstawami teoretycznymi oraz wymaganymi umiejętnościami. Podejście takie można zaakceptować.

Uwagi szczegółowe:

1. str. 12: W sekcji zatytułowanej „Purpose and scope of work” zakres pracy nie został podany. Można o nim jedynie wnioskować, bazując na opisie zawartości poszczególnych rozdziałów.
2. str. 14/18; Autor wymienia programy, komercyjne i niekomercyjne, które wykorzystywane były przez różnych badaczy do realizacji zadań z zakresu Momentum-FSI oraz Thermal-FSI. Praca Autora realizowana była w pakiecie ANSYS – pomijając względy licencyjne, czy jest to najlepszy możliwy wybór? Może inne programy, szczególnie komercyjne, pozwalałyby zrealizować sformułowane w rozprawie zadania w łatwiejszy sposób? Zabrakło rozpoznania w tym zakresie.
3. str. 15: Zamiast „OpenFoam” powinno być „OpenFOAM” (druga część nazwy to akronim pochodzący od sformułowania „Field Operation And Manipulation”).
4. str. 19: Wersory normalne do powierzchni są inaczej oznaczone w tekście oraz na rysunku.
5. str. 19: Autor stwierdził, że „W kontekście analizy numerycznej, zarówno domena cieczy, jak i ciała stałego muszą być podzielone zgodnie z metodami objętości skończonych (FVM) lub metodą elementów skończonych (FEM)”. Czy to oznacza, że nie można zastosować żadnej innej metody numerycznej do wykonania modelu interakcji typu fluid-solid?
6. str. 20: W opisie pojawia się pewna nieścisłość. Autor stwierdza, że symbol T oznacza tensor naprężeń lepkich, po czym podaje równanie (3.8), w którym widać, że oprócz efektów lepkościowych (nieodwracalnych), tensor T zawiera również człon ciśnieniowy (odwracalny).
7. str. 24: Jakie czynniki zadecydowały, że z kilku możliwych w VoF metod rekonstrukcji powierzchni wybrano metodę rekonstrukcji geometrycznej? Czy, zdaniem Autora, sposób rekonstrukcji powierzchni jest ważnym elementem modelowania FSI?

8. str. 27: Osoby nieobeznane z zagadnieniami FSI mogą nie orientować się czym jest element typu 226. Warto byłoby dodać krótkie wyjaśnienie, czym taki element się charakteryzuje.
9. str. 29: W punkcie 4.1 kolejność odwoływania się do rysunków jest zaburzona. Autor najpierw odwołuje się do Rys. 4.3, a później do Rys. 4.2.
10. str. 29: Nie jest wyjaśnione, dlaczego wybrano taką, a nie inną lokalizację punktu P2.
11. str. 29: Nie wyjaśniono czym jest wlot roboczy? Jest to powierzchnia wylotowa rurki, czy jakieś inne miejsce?
12. str. 31: W kontekście pomiarów i systemów akwizycji danych, zamiast „główna pętla pomiarowa”, bardziej stosowane byłoby użycie terminu „częstotliwość próbkowania”.
13. str. 35 i niektóre dalsze: Część wykresów wygenerowana jest w kolorze, a część nie. Pomijając, że jest to pewna niekonsekwencja, korzystniej byłoby używać kolorów zawsze, gdyż poprawia to czytelność rysunków.
14. str. 39: Co oznacza wyrażenie „domain coordinates 105 mm x 5 mm”? W pracy nie wyjaśniono dokładnie jaki układ współrzędnych został zastosowany i gdzie był jego środek.
15. str. 40 (komentarz do Rys. 5.2b): Opisany efekt nie jest dobrze widoczny na tym rysunku. Pomocne byłoby powiększenie dna zbiornika.
16. str. 40: O jakim wskaźniku jakości siatki jest mowa w zdaniu „Most of the elements achieved the quality above 0.95, with a minimum occurring value of 0.41”?
17. str. 43: Jakie jest źródło danych zawartych w Tabeli 5.2?
18. str. 44: Występuje powtórzenie informacji o tym, jakie parametry są wymieniane między solverami (patrz str. 27).
19. str. 44: Dlaczego liczba iteracji sprzężenia w jednym kroku czasowym była zmienna (od 1 do 5)?
20. str. 44: Nie jest jasne o czym dokładnie jest mowa w zdaniu „Fluid flows during the numerical analysis presented a significant degree of variation”.
21. str. 45: W jaki sposób oszacowano prędkość wody na wylocie z dyszy (1,89 m/s)?
22. str. 46: Czym są skrypty APDL? Czy mechanizm ich stosowania jest odpowiednikiem techniki znanej w module ANSYS Fluent jako User Defined Functions?
23. str. 49: Rysunek 5.10 byłby czytelniejszy, gdyby np. materiał zbiornika pokolorować względem przemieszczenia.
24. str. 51: Bardzo trudno jest dopatrzeć się na Rys. 5.13 linii odpowiadającej wynikom analizy CHT. Było to możliwe jedynie w elektronicznej wersji rozprawy, po powiększeniu tego rysunku na pełny ekran.
25. str. 58: Zdanie „Coupled Thermal-FSI analysis properly captured most of flow phenomena, i.e. vortex formation or rupture of the liquid film” nie jest dobrze umotywowane, gdyż Rysunek 5.9, mający być wirtualną reprezentacją wyników widocznych na Rysunku 4.5, jest bardzo niskiej jakości. Ponadto czasy uchwycenia poszczególnych kadrów na obu tych rysunkach są różne.
26. str. 59: Informacja zawarta w zdaniu „The Coupled Thermal-FSI analysis had several times the calculation time of the CHT analysis and an order of magnitude more time than the Thermal Structural analysis” nie jest poparta żadnymi danymi. Oczywiście jest, że generalnie stosowanie dwóch solverów i ich sprzężenie będzie bardziej wymagające obliczeniowo niż zastosowanie pojedynczego solwera.
27. str. 60.: W treści pracy nie udało się odszukać odwołania do załącznika A.

8. Ocena, czy rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy naukowej, prezentując oryginalne podejście do analizy zjawisk termo-mechanicznych na styku płynów i ciał stałych. Do głównych elementów innowacyjności należą:

- Opracowanie unikalnego stanowiska badawczego, umożliwiającego badanie specyficznej interakcji między płynem a ciałem stałym, w której wymuszenie termiczne prowadzi do gwałtownego wybożenia konstrukcji.
- Stworzenie oryginalnego, złożonego modelu symulacyjnego, odzwierciedlającego zjawiska zaobserwowane w eksperymencie na zadowalającym poziomie.
- Zaprojektowanie kompleksowego planu badawczego, łączącego eksperyment z modelowaniem numerycznym realizowanym w kilku wariantach, co pozwoliło na dogłębną i wszechstronną analizę problemu.

9. Ocena, czy rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej

Rozprawa doktorska świadczy o szerokiej wiedzy oraz dużych umiejętnościach praktycznych Autora, co przejawia się w następujących aspektach:

- Autor zaprezentował zdolność do tworzenia naukowych opracowań w języku angielskim, umiejętność składu tekstów w środowisku TeX oraz talent w prezentowaniu treści naukowych.
- Praca dowodzi biegłości w kluczowych pojęciach, modelach i metodach badawczych z zakresu inżynierii mechanicznej, obejmujących metody numeryczne, eksperymentalne oraz zaawansowane techniki analizy i przetwarzania danych.
- Autor wykazał się doskonałą znajomością wybranych modułów pakietu ANSYS, co świadczy o jego kompetencjach technicznych i naukowych w realizacji skomplikowanych projektów badawczych – w ramach jednej niestacjonarnej symulacji numerycznej, uwzględniającej analizę termiczną, zintegrował dwukierunkowo solver CFD (w wariacie VoF z ruchomymi siatkami) oraz CSD (z użyciem dwóch autorskich skryptów APDL), co nie jest zadaniem trywialnym.

Wszystkie te elementy wskazują nie tylko na gruntowną wiedzę teoretyczną, ale również na dojrzałość badawczą oraz zdolność do samodzielnej pracy naukowej. Szczególnie warto podkreślić interdyscyplinarny charakter rozprawy, który wymaga zaawansowanej wiedzy i umiejętności zarówno z zakresu termo-mechaniki ciał stałych, jak i termo-mechaniki płynów.

10. Opinia końcowa

Podsumowując recenzję rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Bartosza Kraszewskiego pt. „Capturing rapid nonlinear phenomena using coupled thermal fluid-solid interaction numerical analysis”, stwierdzam, że:

1. Uzyskane przez Kandydata wyniki mają istotną wartość poznawczą w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna, wnosząc oryginalne elementy do badań nad szybkimi zjawiskami nieliniowymi z wykorzystaniem sprzężonej analizy numerycznej oddziaływań cieplnych między płynem a ciałem stałym.
2. Przedstawiony materiał świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu teoretycznym Kandydata oraz o jego wysokich umiejętnościach w zakresie prowadzenia badań eksperymentalnych i praktycznego wykorzystywania zaawansowanego oprogramowania komercyjnego, takiego jak ANSYS Workbench, ANSYS Fluent, ANSYS Mechanical oraz ANSYS System Coupling, a także innych narzędzi przydatnych zarówno w badaniach eksperymentalnych, jak i w analizie oraz obróbce danych.
3. Kandydat wykazał się dojrzałością badawczą, potwierdzając tym samym gotowość do samodzielnego prowadzenia badań naukowych w przyszłości.

Wobec powyższego stwierdzam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Bartosza Kraszewskiego pt.: „Capturing rapid nonlinear phenomena using coupled thermal fluid-solid interaction numerical analysis” spełnia wymagania w sensie Art. 187. Ustawy z dnia 20 lipca 2018 o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z dn. 20.04.2023 r. poz. 742 ze am.) i **może stanowić podstawę do przeprowadzenia publicznej obrony.**

.....
6 grudnia 2024