Dr hab. Artur Maciąg, prof. PŚk
Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego
Politechnika Świętokrzyska

Kielce 05.08.2019r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Tutaka pt. „Naprężenia termiczne w chłodnicach powietrza doładowanego powstające w procesie ich walidacji"

(recenzja wykonana na zlecenie Rady Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej na podstawie uchwały z dnia 05.07.2019r.)

1. Zakres tematyczny rozprawy oraz ocena celowości podjęcia tematu

Zwiększenie mocy i sprawności silnika turbodoładowanego uzyskuje się między innymi poprzez zastosowanie chłodnicy powietrza doładowanego zwanej chłodnicą pośrednią lub z angielskiego intercoolerem. Ma ona za zadanie chłodzenie powietrza opuszczającego turbosprężarkę, co skutkuje zwiększeniem jego gęstości a tym samym zwiększeniem ilości tlenu trafiającego do komory spalania. Konstrukcja chłodnicy powietrza doładowanego wydaje się stosunkowo prosta. Niemniej jednak i tu wymagany jest kompromis pomiędzy gabarytami i masą urządzenia a jego bezawaryjnością. Jedną z możliwych awarii są pęknięcia rurek chłodnicy. Stąd też prototyp chłodnicy, przed wejściem do seryjnej produkcji, poddawany jest serii testów cykli termicznych. Temu zagadnieniu poświęcona jest przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Tutaka. Głównym celem pracy była poprawa wytrzymałości konstrukcji chłodnicy powietrza doładowanego, tak aby pozytywnie przechodziła ona serie testów cykli termicznych. Należało zatem wyeliminować pęknięcia rurek pojawiające się na skutek naprężeń termicznych w czasie pracy chłodnicy. Wymagało to z jednej strony budowy modelu opisującego pola temperatury oraz naprężeń w czasie pracy chłodnicy z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych, a z drugiej przeprowadzenia badań eksperymentalnych. Wyniki tych badań wykorzystano do modyfikacji pierwotnie zaproponowanego modelu symulacji testu cykli termicznych w wyniku czego uzyskano dużą zgodność wyników teoretycznych i eksperymentalnych. Dodatkowo Autor zaproponował zmiany konstrukcyjne chłodnicy powietrza doładowanego, które doprowadziły do wyeliminowania pęknięć rurek. W świetle wymogów konstrukcyjnych silników samochodowych celowość podjętego tematu rozprawy doktorskiej nie budzi żadnych wątpliwości. Umiejętne połączenie modelowania i symulacji komputerowych z eksperymentem, widoczne w rozprawie, dało spodziewane wyniki w postaci poprawy wytrzymałości chłodnicy na naprężenia.

2. Ocena formalna rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Tutaka liczy sto sześćdziesiąt osiem stron. Należy ją uznać za pracę bardzo obszerną. Tytuł pracy jest odpowiedni i w pełni koreluje z jej zawartością. Rozprawa składa się z dziesięciu merytorycznych rozdziałów (w tym wstępu oraz podsumowania i wniosków końcowych) oraz spisu literatury. Praca zawiera w szczególności wymagane streszczenie w języku polskim oraz angielskim.

Bibliografia rozprawy zawiera sto dwa źródła literaturowe oraz jedenaście źródeł internetowych. Są to zarówno aktualne artykuły naukowe w renomowanych czasopismach, jak i pozycje książkowe. Niestety, tylko jedna spośród tak wielu wymienionych pozycji jest autorstwa Doktoranta. Jest to publikacje w czasopiśmie Journal of Applied Computer Science Methods, znajdującym się na tak zwanej liście B i wedle wiedzy recenzenta dość nisko punktowanym. Wszystkie wymienione pozycje literaturowe cytowane są w rozprawie.

Podział pracy oraz objętość rozdziałów są w większości przypadków prawidłowe (pewne krytyczne uwagi zamieszczono dalej). Pozwala to na realizację postawionego celu. Również poza nielicznymi błędami stylistycznymi i redakcyjnymi praca napisana jest w sposób zrozumiały dla czytelnika a sama narracja jest logiczna i klarowna. Pierwszych sześć rozdziałów ma charakter rozważań teoretycznych opisujących narzędzia wykorzystane w praktycznej części pracy zawartej w pozostałych rozdziałach.

3. Zwartość pracy, ocena merytoryczna oraz mocne strony pracy

Celem pracy jest: „poprawa wytrzymałości konstrukcji chłodnicy powietrza doładowanego na naprężenia termiczne powstające podczas testu cykli termicznych." Zawartość pracy pokazuje, że skupiono się na rozwiązaniu problemu pękających rurek podczas testu cykli termicznych, co w zasadzie zawiera się we wcześniejszym, bardziej ogólnym sformułowaniu. Cel ten jest zatem natury projektowo-konstrukcyjnej. Zwiera on jednocześnie oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Teza pracy brzmi: „Istnieje możliwość poprawy wytrzymałości konstrukcji chłodnicy powietrza doładowanego na naprężenia termiczne i zaliczenia testu cykli termicznych na podstawie opracowanego modelu komputerowego oraz przeprowadzonych badań doświadczalnych." Realizacji celu pracy oraz wykazaniu powyższej tezy podporządkowana jest zawartość wszystkich rozdziałów rozprawy.

Pierwszym rozdziałem rozprawy jest wstęp (liczący cztery strony), w którym Autor zawiera ogólne uwagi na temat chłodnic powietrza doładowanego.

W rozdziale drugim (liczącym dziesięć stron) przedstawiono wyczerpujący przegląd literatury. Znaleźć tu również można cel oraz tezę pracy, jak również omówienie zawartości poszczególnych rozdziałów rozprawy.

Rozdział trzeci (liczący trzynaście stron) zawiera opis testu cykli termicznych dla chłodnic powietrza doładowanego. Opisano tu również historię wszystkich testów cykli termicznych, które wykonano dotychczas dla analizowanej konstrukcji chłodnicy.

Treścią rozdziału czwartego (liczącego sześć stron) są naprężenia cieplne ośrodka ciągłego. Autor prezentuje równania liniowej teorii sprężystości oraz liniowej teorii naprężeń cieplnych. W szczególności przedstawiono równania równowagi, prawo Hooke'a oraz równanie Naviera.

Omówiono tu także równanie przewodnictwa ciepła wraz ze stosownymi warunkami początkowo-brzegowymi.

Przegląd modeli numerycznych wykorzystywanych w procesach walidacyjnych zawarto w rozdziale piątym (liczącym jedenaście stron). Autor skupia się na dwóch symulacjach komputerowych, które stanowią punkt wyjściowy dla prac własnych Doktoranta. Pierwsza z nich, opisana przez S.Kędziora bazuje na wykorzystaniu kamery termowizyjnej do określenia pola temperatury radiatora. Druga praca, której autorami są S.Maoa, Ch.Changrui, L.Xianchang, E.Efstathios pokazuje zastosowanie symulacji jednokierunkowej z wykorzystaniem analizy przepływowej CFD oraz analizy strukturalnej MES.

Rozdział szósty (liczący trzydzieści siedem stron) to zasadniczo opis Metody Elementów Skończonych. Znajduje się tu ogólny opis środowiska Abaqus. Większość rozdziału poświęcona jest Metodzie Elementów Skończonych. Autor szczegółowo omawia powszechnie znane pojęcia MES, takie jak rodzaje elementów, funkcje kształtu czy macierz sztywności. Podane są wręcz przykłady konstrukcji rozwiązań stanu naprężenia oraz stacjonarnej wymiany ciepła. W rozdziale tym zamieszczono również algorytm przebiegu obliczeń w MES dla rozkładu temperatury oraz odkształceń i naprężeń. Ostatni podrozdział zawiera wyniki numerycznej analizy wymiany ciepła w układzie taśma-rurki-taśma dla rozważanej chłodnicy powietrza doładowanego. Rozważano przy tym różne prędkości powietrza chłodzącego. W modelu pominięto turbulator, co zrekompensowano przyjęciem mniejszych wartości masowego natężenia przepływu powietrza doładowanego. Wykorzystano tu również regresję liniową w celu weryfikacji założenia o liniowym rozkładzie temperatury wzdłuż osi y.

Rozdział siódmy (liczący dwadzieścia sześć stron) zawiera opis opracowanego modelu numerycznego chłodnicy powietrza doładowanego do symulacji testu cykli termicznych. Przy upraszającym założeniu, że taśma chłodząca nie zawiera żaluzji uzyskano rozkład temperatury oraz odkształceń i naprężeń. Proponowany model poddano walidacji. Okazało się, że brak jest korelacji pomiędzy symulacją komputerową a wynikami testów.

W rozdziale ósmym (liczącym trzynaście stron) zamieszczono opis oraz wyniki badań doświadczalnych pomiaru temperatur oraz odkształceń. Uzyskane wyniki wykorzystano w skorygowanym modelu opisanym w rozdziale dziewiątym (liczącym dwadzieścia trzy strony). Rozdział ten zawiera również zalecenia zmian eksploatacyjnych i konstrukcyjnych. W szczególności zamieszczono tu i zweryfikowano propozycję zmiany konstrukcji chłodnicy powietrza doładowanego, która redukuje naprężenia powodujące pęknięcia rurek. Podsumowanie i wnioski zawarto na trzech stronach rozdziału dziesiątego.

Treść zawarte w opisanych wyżej rozdziałach realizują założony cel pracy. Najważniejsze atuty pracy wymieniono niżej.

- Podjęcie przez Doktoranta trudnego tematu modelowania serii testów cykli termicznych dla chłodnic powietrza doładowanego. Jest to ważne zagadnienie z praktycznego punktu widzenia.
- Dobrze opisany stan wiedzy oraz wynikające stąd działania Autora.
- W pracy znajduje się model, jego walidacja, wynikająca stąd modyfikacja modelu i wreszcie zalecenia zmian konstrukcyjnych chłodnicy.
- Ulepszenie modelu MES poprzez dyskretyzację obszarów skrajnych rurek oraz wykorzystanie trzech rozmiarów elementów tetra.
- Propozycja rozwiązania konstrukcyjnego, które polega na połączeniu obejmy z płytą wraz z przecięciem w odległości 50 mm od płyty wlotowej. Takie rozwiązanie pozwoliło na znaczną redukcję naprężeń głównych rurek w miejscach ich uszkodzeń.

- Propozycja rozwiązania konstrukcyjnego, które polega na zastosowaniu rurek zawijanych zamiast spawanych.
- Propozycja modyfikacji kształtu czterech skrajnych rurek, co również prowadzi do redukcji naprężeń.

Realizacja pracy wymagała wykorzystanie wiedzy z zakresu mechaniki ośrodków ciągłych. W szczególności wymagało to znajomości równań naprężeń termicznych oraz przewodnictwa ciepła. Dodatkowo konieczna była znajomość Metody Elementów Skończonych oraz profesjonalnych pakietów obliczeniowych realizujących tę metodę. Opanowanie tych obszarów świadczy o posiadanym przez Doktoranta warsztacie naukowym. Autor wykazał, że możliwa jest modyfikacja konstrukcji chłodnicy powietrza doładowanego prowadząca do zwiększenia jej wytrzymałości. Należy podkreślić, że rozważana tematyk jest aktualna a uzyskane wyniki znajdują zastosowanie w praktyce.

4. Uwagi krytyczne

Pomimo niewątpliwych zalet, w odniesieniu do recenzowanej pracy sformułować można uwagi krytyczne.

Niżej wymieniono zauważone niedoskonałości pracy, które nie wpływają znacząco na jej ocenę **i nie wymagają komentarza Autora**.

- Literatura nie do końca jest posortowana alfabetycznie (np. Cichoń, Laxmikant, Incropera, Ismael).
- Nie jest jasne w jakim celu cytowane są obszerne fragmenty omawianych artykułów (np. str. 16 i 17).
- Na stronie 46 i 48 pojawia się określenie „współczynnik transferu ciepła". Jest to dosłowne tłumaczenie z języka angielskiego. Chodzi zapewne o współczynnik przewodzenia ciepła.
- W opinii recenzenta zbędny jest rozdział 6.1 uzasadniający wybór MES, jako metody obliczeniowej. Pozwoliło by to na skrócenie i tak obszernej pracy. Z tego samego powodu w tym samym rozdziale nie było konieczne zamieszczanie dokładnego opisu powszechnie znanej teorii MES, tym bardziej że i tak Doktorant korzysta z gotowych pakietów obliczeniowych.
- W pracy występują nieliczne błędy językowe i stylistyczne. Na przykład na stronie 65 znajdujemy niezręczny skrót myślowy: „opierając swoje rozważania na materiale izotropowym". Lepiej powiedzieć, że zakłada się izotropowość materiału. Na stronie 66 znajdujemy: „zmienną niezalena" zamiast „zmienną niezależną" oraz „pole powierzchni **elementy** trójkątnego". Na stronie 72 czytamy: „polegającym na założeniu rozkładu temperatury w rurkach na podstawie funkcji liniowych". Po prostu założono liniowy rozkład temperatury.
- Strona 68. Raczej nie stosuje się sformułowania „zagadnienia przenoszenia ciepła".
- „Przeplatanie" rysunków tekstem w rozdziałach 7.3, 8.2 oraz 8.3 ułatwiło by lekturę tekstu.
- Używany w pracy zwrot „analiza przewodzenia ciepła Fouriera" jest skrótem myślowym i może być mylący. Nie chodzi tu zapewne o analizę fourierowską a jedynie o rozwiązanie równania Fouriera-Kirchhoffa.

Recenzent zauważył w pracy pewne niedoskonałości, które **wymagają komentarza Autora**. Wymieniono je niżej.

- Co upoważnia do wniosku na stronie 33, że pęknie również druga rurka, gdy test będzie kontynuowany?
- Równanie 4.4.1 opisuje przypadek niestacjonarny a nie jak pisze Autor stacjonarny.
- We wzorze 4.4.2 występuje gęstość strumienia ciepła.
- Stronia 38. Autor pisze o warunku początkowym i brzegowym. Warunków brzegowych jest zwykle więcej niż jeden.
- Strona 39. Warunek Robina nie określa ani temperatury płynu ani współczynnika przejmowania ciepła – w przypadku zagadnienia bezpośredniego są to wartości zadawane (znane). Ponadto swobodna wymiana nie musi dotyczyć tylko płynu.
- Nie jest jasne zdanie na końcu strony 49: „czyli stanowi największych gradientów temperatury".
- Początek rozdziału 6.3 jest napisany bardzo niejasno i nieprecyzyjnie.
- Strona 60. Pole trójkąta wyraża się wyznacznikiem a nie macierzą (oznaczenie).
- Dla równania 6.4.1 chodzi raczej o warunki brzegowe a nie graniczne.
- Strony 68 i 70. Cytowane są fragmenty tekstu bez podania ich źródła.
- Zdanie opisujące wzór 6.6.20 jest niejasne. Co jest minimalizowane we współrzędnych „prostokątnych" (kartezjańskich) a co w przypadku zagadnień osiowo-symetrycznych?
- Co we wzorze 6.6.20 oznaczają $k_x, \lambda_y, \alpha, T_p, q_s$?
- Z postaci wzoru 6.6.22 wynika, że liczbę elementów oznaczono jako NE a nie jako E.
- Rysunek 6.7.31 przedstawia średnią temperaturę w przekroju XZ. Jak wyznaczana jest średnia?
- Jaką wartość współczynnika przejmowania ciepła przyjęto w rozdziale 6.7?
- Weryfikacja statystyczna poprawności modelu regresji liniowej nie polega na wyznaczaniu wartości reszt modelu. Należało przeprowadzić rzetelną weryfikację modelu (testy istotności parametrów) lub przynajmniej wyznaczyć współczynnik determinacji.
- Strona 88. Wyjaśnienia wymagają „ostre krawędzie", „nieciągłości modelu" oraz „promienie".
- Skąd wiadomo, że wartości naprężeń dla rurki 33 (rys. 9.1.9, 9.1.11, 9.1.13 oraz 9.1.15) to skutki błędu w geometrii CAD i na czym ten błąd polegał?
- Na rysunkach 9.2.26 oraz 9.2.27 Autor błędnie nazywa promieniami wartości 0,75mm oraz 3,2mm. O ile dla przypadku R=3,2mm przekrój rurki przypomina okrąg, to dla 2R=0,75 przekrój okręgiem nie jest. W opinii recenzenta należało raczej wspomnieć o krzywiźnie brzegu.
- Strona 157. W podanej pozycji [www,11] znajduje się Engineering Statistics Handbook a nie modyfikacja równania Coffina-Mansona.

Recenzent prosi również Autora pracy o ustosunkowanie się do niżej wymienionych pytań, które nasuwają się podczas jej lektury.

- Pominięcie w modelu turbulatora zrekompensowano zmniejszeniem wartości masowego natężenia przepływu powietrza doładowanego. Jak zrekompensowano pominięcie żaluzji taśmy?
- W rozdziale 7.3 rozważany jest (po przyjęciu stałych w czasie warunków brzegowych) stan ustalony dla liczb Fouriera powyżej 2,5. Skąd Autor ma pewność, że po osiągnięciu stanu

ustalonego występuje największy gradient temperatury (wzdłuż rurek przyjęto liniowy rozkład temperatur) i że w czasie rozruchu gradient nie jest większy?

5. Podsumowanie oraz wniosek końcowy

Przedłożona do recenzji rozprawa zawiera opis aktualnego tematu badawczego i dowodzi, że Doktorant wykazał się umiejętnościami wymaganymi w trakcie samodzielnej pracy naukowej, dysponując przy tym niezbędną wiedzą teoretyczną. W szczególności Autor zna literaturę przedmiotu oraz opanował warsztat naukowy niezbędno do rozwiązania analizowanego problemu. Badania empiryczne zaplanowano, przeprowadzono i wykorzystano w sposób prawidłowy. Doktorantowi wprawdzie nie udało się uniknąć nieznacznych błędów w trakcie pisania pracy, jednak nie umniejsza to znaczenia wykonanej pracy.

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Piotra Tutaka „Naprężenia termiczne w chłodnicach powietrza doładowanego powstające w procesie ich walidacji" **spełnia wymagania ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę o przyjęcie rozprawy oraz dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony**.

Artur Maciąg