Prof. dr hab. inż. Michał Ciałkowski
Wydział Maszyn Roboczych i Transportu
Katedra Techniki Cieplnej

Poznań, 26.11.2014

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Brodzika
pt.: „WPŁYW USZKODZEŃ MECHANICZNYCH NA WZROST OBCIĄŻEŃ CIEPLNYCH MATERIAŁU IZOLACYJNEGO POJAZDU ORBITALNEGO”.

Podstawę do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgra inż. Łukasza Brodzika stanowi pismo DR-63/443/01/2014 Dziekana Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej z dnia 07.11.2014r.

Praca zawarta jest na 130 stronach i jest podzielona na 8 rozdziałów poprzedzonych: spisem treści, wykazem ważniejszych oznaczeń, a w zakończeniu: spisem rysunków, spisem tabel, bibliografią liczącą 55 pozycji literaturowych związanych z tematem pracy, streszczeniem w językach polskim i angielskim.

1. Omówienie pracy

Każda działalność ludzka związana jest z pewnym stopniem zagrożenia. Analiza zagrożeń i ich minimalizowanie jest silnym bodźcem rozwoju badań naukowych. Wysyłanie obiektów w przestrzeń kosmiczną związane jest z wieloma zagrożeniami wynikającymi z przebywania w przestrzeni kosmicznej (gruz kosmiczny) jak również z powrotem obiektu na Ziemię. Powrót na Ziemię wymaga przejścia przez gęste warstwy atmosfery czemu towarzyszy nagrzewanie aerodynamiczne, którego zagrożenie wzrasta w przypadku mechanicznego uszkodzenia powłoki obiektu. Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do problematyki poruszanej w pracy. Przedstawione zostały procesy wymiany ciepła zachodzące w czasie nagrzewania aerodynamicznego. Opisane zostały rodzaje osłon termicznych ochraniające poszycie statku oraz zagrożenia związane z ich stosowaniem. W rozdziale dokonano przeglądu literatury. **Na podstawie przeprowadzonych badań literaturowych doktorant zauważył, że brak jest badań powłok ochronnych pod kątem zwiększenia ich właściwości termicznych w celu zwiększenia ochrony przed negatywnym oddziaływaniem obciążenia termicznego**. Badania uszkodzonych powłok ochronnych dotyczyły analizy pogarszania się właściwości termicznych uszkodzonej powłoki ochronnej. Stąd wynika cel pracy doktorskiej mgra inż. Łukasza Brodzika, którym jest zbadanie możliwości zmiany właściwości termicznych izolacji przez dodanie do powłoki ochronnej materiału przewodzącego o dużej wartości ciepła właściwego w postaci dodatkowej warstwy lub jako domieszki do warstwy izolacyjnej. Zmiana właściwości termicznych powłoki ochronnej powinna umożliwić wydłużenie czasu nagrzewania płytki izolacyjnej do temperatury maksymalnej w trakcie powrotu pojazdu kosmicznego na Ziemię.

W rozdziale drugim sformułowane zostało zagadnienie brzegowo – początkowe przewodzenia ciepła w obszarze złożonym z warstw powłoki ochronnej: LI900 i SIP oraz

poszycia statku z aluminium. Do obliczeń przyjęto fragment powłoki ochronnej oraz poszycia o rozmiarach pojedynczej płytki. Na brzegu zewnętrznym płytki przyjęty został znany, zmienny w czasie przebieg strumienia ciepła wnikającego do powłoki ochronnej. Część tego strumienia jest wypromieniowana na zewnątrz powłoki. Na pozostałych brzegach obszaru założony został warunek izolacji termicznej, który z punktu widzenia wymiany ciepła jest najmniej korzystny. Przebieg w czasie strumienia ciepła przyjęty został z badań eksperymentalnych zamieszczonych w literaturze. Własności termiczne poszczególnych warstw płytki były zależne od temperatury i uwzględniały anizotropię współczynnika przewodności cieplnej materiału osłony LI900, zatem zagadnienie przewodnictwa ciepła z tego względu było zagadnieniem nieliniowym. W przypadku płytki nieuszkodzonej, ze względu na symetrię geometrii oraz warunków brzegowych jest to zagadnienie jednowymiarowe. Dla płytki uszkodzonej uwzględniony został złożony stan promieniowania cieplnego we wnęce uszkodzenia, mający wpływ na rozkład strumienia ciepła wnikającego do powłoki ochronnej. Na tej podstawie przeprowadzono analizę termomechaniczną za pomocą programu ANSYS, a otrzymane wyniki porównane zostały z wynikami zawartymi w literaturze.

W rozdziale trzecim przedstawione zostały wyniki obliczeń termicznych dla płytki uszkodzonej i nieuszkodzonej dla tych samych warunków brzegowo-początkowych jak w rozdziale drugim. Obliczenia zostały wykonane za pomocą napisanych przez doktoranta programów w kodzie niekomercyjnym FreeFem++. Do wyznaczenia rozkładu strumienia ciepła wnikającego do płytki, w części uszkodzonej płytki zostało rozwiązane równanie transportu promieniowania. W obliczeniach uwzględniony został wpływ ciśnienia otoczenia na współczynnik przewodzenia ciepła materiału LI900. Wyniki obliczeń przedstawione w tym rozdziale pokrywały się z dużą dokładnością z wynikami uzyskanymi w rozdziale poprzednim oraz wynikami z literatury.

W rozdziale czwartym zamieszczone zostały wyniki obliczeń z uwzględnieniem dodatkowych warstw powłoki ochronnej, które zostały pominięte we wcześniejszych obliczeniach. Wyniki wskazują, że wpływ tych dodatkowych warstw na własności termiczne powłoki jest niewielki, stąd pominięcie ich we wcześniejszych i dalszych obliczeniach jest w pełni uzasadnione.

W rozdziale piątym przedstawione zostały wyniki obliczeń termicznych warstwy ochronnej z dołączoną w jej wnętrzu warstwą przewodzącą. Zadaniem tej dodatkowej warstwy przewodzącej, jak pokazały rozkłady temperatury na powierzchni poszycia statku, było opóźnienie wzrostu temperatury poszycia statku. Efekt ten jest możliwy dzięki dużej pojemności cieplnej tej warstwy, ponieważ cześć strumienia ciepła, która normalnie płynie w kierunku poszycia, zużyta została do wzrostu energii wewnętrznej tej warstwy, a cześć była zawracana w stronę przeciwną w obszarach, gdzie nie ma uszkodzenia. Obliczenia wykonane zostały dla warstwy przewodzącej złożonej z różnych materiałów, umieszczonej w wybranych odległościach od brzegu zewnętrznego płytki. **Zawarte w tym rozdziale wyniki obliczeń są realizacją celu pracy postawionego przez doktoranta**.

W rozdziale szóstym opisana wcześniej koncepcja poprawienia własności termicznej uszkodzonej powłoki ochronnej obciążonej zmiennym strumieniem ciepła została

zastąpiona wprowadzeniem do materiału izolacyjnego opiłków metalu o zadanej koncentracji i położeniu przestrzennym, która zwiększa pojemność cieplną materiału izolacyjnego oraz zwiększa współczynnik przewodzenia ciepła w kierunku poprzecznym do chronionego. Doktorant wyznaczył dwiema metodami zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła zmodyfikowanej warstwy ochronnej oraz zbadał wpływ założeń upraszczających dla wybranych wartości koncentracji opiłków metalu w warstwie izolacji na przebieg temperatury na poszyciu statku. Przeprowadzona analiza potwierdziła słuszność poczynionych założeń. Podobnie jak w rozdziale piątym na poszyciu statku orbitalnego wyraźnie widać, że czas po którym następuje wzrost temperatury poszycia statku jest znacznie opóźniony, zależnie od materiału, z którego są wykonane opiłki materiału przewodzącego. Przesuwa się również czas wystąpienia maksimum temperatury oraz zmniejsza się jej wartość na powierzchni aluminium (poszycia statku).

Rozdział siódmy stanowi rozszerzenie rozważań przedstawionych w rozdziale poprzednim. Autor przedstawił algorytm iteracyjny służący do wyznaczania rozkładu koncentracji materiału przewodzącego w warstwie izolacji LI900. **Sformułowane i rozwiązane przez Doktoranta zagadnienie jest zagadnieniem odwrotnym przewodnictwa ciepła.** Na podstawie wyznaczonych z zagadnienia odwrotnego rozkładów koncentracji zostały przeprowadzone obliczenia, które potwierdziły możliwość uzyskania efektu opóźnienia wzrostu temperatury na powierzchni poszycia dla zmiennych rozkładów koncentracji materiału przewodzącego w warstwie izolacji LI900.

Rozdział ósmy stanowi podsumowanie prowadzonych przez Doktoranta prac oraz wskazanie dalszych kierunków badań.

2. Uwagi

W trakcie czytania pracy zauważyłem drobne nieścisłości językowe (np. w podpisie pod rys. 1.5 , tablicy 1.1 i inne) co nie umniejsza wartości wyników osiągniętych przez Autora. Te drobne nieścisłości omówiłem z Doktorantem

3. Podsumowanie

Praca doktorska mgra inż. Łukasza Brodzika potwierdziła słuszność tezy, że zmiana właściwości termicznych izolacji przez dodanie do powłoki ochronnej materiału przewodzącego o dużej wartości ciepła właściwego w postaci dodatkowej warstwy lub jako domieszki warstwy izolacyjnej powoduje wydłużenie czasu nagrzewania płytki izolacyjnej WIZWU do temperatury maksymalnej w trakcie powrotu na Ziemię pojazdu kosmicznego.

Układ pracy jest przejrzysty: na początku Doktorant opisuje problem badawczy oraz formułuje cel pracy. Następnie wykonuje obliczenia, które konfrontuje z wynikami z literatury oraz wykonanymi w kodzie komercyjnym ANSYS. Mając przetestowane napisane przez siebie programy w środowisku niekomercyjnym FreeFem++, sprawdza za pomocą tych programów zaproponowane przez siebie metody poprawienia własności termicznych uszkodzonych powłok ochronnych. Swoją pracę kończy rozwiązaniem zagadnienia

odwrotnego przewodnictwa ciepła związanego z optymalnym rozkładem koncentracji materiału przewodzącego w warstwie izolacji LI900.

Na szczególną uwagę zasługuje:

- **nowatorska koncepcja poprawy własności termicznych uszkodzonej warstwy ochronnej statku orbitalnego przez wstawienie dodatkowej warstwy przewodzącej, która powoduje opóźnienie wzrostu temperatury poszycia statku oraz bardziej równomierny strumień ciepła płynącego przez izolację SIP do poszycia,**
- **koncepcja poprawy własności termicznych uszkodzonej warstwy ochronnej statku orbitalnego przez modyfikację warstwy ochronnej poszycia, która podobnie jak poprzednio powoduje opóźnienie wzrostu temperatury poszycia statku orbitalnego,**
- **opracowanie algorytmu iteracyjnego do wyznaczania rozkładu koncentracji opiłków metalu w warstwie izolacji LI900. Zagadnienie takie należy do klasy zagadnień odwrotnych (szczególnie trudnych do rozwiązania),**
- **autorskie programy napisane w środowisku FreeFem++.**

Wykorzystanie nowoczesnych narzędzi obliczeń (pakiet ANSYS i FreeFem++) w połączeniu z umiejętnością samodzielnego tworzenia własnych programów stanowi o wysokich umiejętnościach Doktoranta i jego przygotowaniu do prowadzenia badań naukowych.

W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgra inż. Łukasza Brodzika spełnia wymogi Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę do Rady Wydziału Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie mgra inż. Łukasza Brodzika do publicznej obrony recenzowanej pracy.