

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Marcina Jamontta pt.

„Engineering and inspection problems study for turbine guide van mechanical component”

Podstawa opracowania: Pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej nr RNDIM/521/26/2021.

Wprowadzenie

W procesie projektowania silników lotniczych stosowane są różne metody zmierzające do zwiększenia dokładności wykonania podzespołów. W biurach projektowych od wielu lat geometria części definiowana jest w formie cyfrowej z wykorzystaniem systemów CAD. Bazując na geometrii zespołu w formacie CAD, w łatwy sposób można stworzyć model dyskretny a następnie przeprowadzić szereg analiz inżynierskich. W przypadku gdy transformacja geometrii do innego typu pliku zostanie przeprowadzona nieprawidłowo, następuje zniekształcenie fragmentów powierzchni i w konsekwencji zmiana wymiarów nominalnych. Inny problem, dotyczący zmiany wymiarów występuje w przypadku łopatek aparatów kierujących (nazywanych także jako łopatki wieńców dyszowych), które podczas pracy nagrzewają się do temperatury powyżej 1000°C i ulegają deformacji termicznej. Geometria łopatki gorącej (określona w wyniku obliczeń przepływowych, dla warunków pracy turbiny) jest różna od geometrii łopatki badanej w warunkach laboratoryjnych. Istnieje zatem potrzeba opracowania procedur dotyczących transformacji (skalowania termicznego) podzespołów pracujących w warunkach obciążeń cieplnych. Procedury te mogą być przydatne w trakcie projektowania, badań oraz kontroli podzespołów.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że pomimo wdrażania nowych technologii wytwarzania np. łopatek monokrystalicznych o większej odporności na pęcznienie lub barierowych powłok termicznych, został obecnie osiągnięty pewien poziom sprawności silnika turbinowego, związany z limitem natury materiałowej, przez co nie jest możliwe dalsze zwiększanie temperatury gazów spalinowych przed turbiną. Jedną z alternatywnych metod, które mogą

obniżyć jednostkowe zużycie paliwa silników lotniczych jest optymalne i precyzyjne kształtowanie aparatów kierujących, które zmieniają parametry przepływającego gazu (poprzez zmienny przekrój kanału) a także kierunkują pod właściwym kątem strumień gazów spalinowych na wirujące łopatki turbiny.

Biorąc pod uwagę powyższe, można stwierdzić, że tematyka pracy doktorskiej mgr inż. Marcina Jamontta, dotycząca kształtowania geometrii oraz analizy odkształceń termicznych (skalowania termicznego) aparatów kierujących turbiny wpisuje się we współczesne trendy dotyczące projektowania, badań oraz kontroli silników lotniczych. Głównym celem ww. prac są działania zmierzające do zwiększenia dokładności wykonania aparatów kierujących, co może przyczynić się do zwiększenia sprawności silników lotniczych.

Charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Jamontta została zredagowana w języku angielskim i liczy 91 stron. Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów. Na wstępie Autor zamieścił streszczenie w języku angielskim oraz polskim a także wykaz skrótów stosowanych w pracy. Dodatkowo zamieszczono informacje, że badania opisane w pracy były rozwijane oraz opublikowane dzięki uprzejmości firmy General Electric Company Polska Sp. z o.o. Badania realizowano w ramach doktoratu wdrożeniowego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (projekt nr. 4DW/2017).

Pracę rozpoczyna wprowadzenie, w którym przedstawiono wybrane zagadnienia z zakresu budowy silnika turbinowego ze zwróceniem szczególnej uwagi na złożoną geometrię łopatki aparatu kierującego turbiny. Dodatkowo Autor charakteryzuje popularne formaty plików zawierających geometrię obiektu, stosowane w technice CAD. Uwagę poświęcono także problematyce pomiarów geometrii za pomocą maszyn współrzędnościowych oraz technice optycznego skanowania geometrii.

W kolejnym rozdziale zdefiniowano tezę oraz główne cele pracy. Teza pracy głosi że: „Dokładność wykonania łopatek aparatów kierujących może być zwiększona za pomocą poprawnej translacji danych cyfrowych i poprawnej optymalizacji kształtu”.

W rozdziale trzecim scharakteryzowano typowe przypadki deformacji profilu łopatki oraz zdefiniowano schemat blokowy transformacji geometrii części gorącej (łopatki nagrzanej poprzez gazy spalinowe, której geometria jest traktowana jako bazowa w obliczeniach gazodynamicznych) do części zimnej (element kontrolowany na stanowisku

badawczym w temperaturze otoczenia). Następnie tworzony jest model CAD łopatki, bazujący na ww. transformacji. W kolejnym etapie dokonywana jest powtórna transformacja nowo utworzonego modelu do części gorącej. Autor w rozdziale 3 przedstawia także wyniki obliczeń iteracyjnych, dotyczących transformacji łopatki z użyciem metody Powella oraz metody gradientów sprzężonych. Do ww. transformacji wykorzystano metodę elementów skończonych. Jako materiał części testowej przyjęto stop niklu Inconel 718, stosowany powszechnie w łopatkach turbiny silników lotniczych starszej generacji.

Rozdział czwarty dotyczy opisu wymagań oraz typowych błędów występujących w plikach CAD stosowanych na etapie wytwarzania i kontroli części. W testach dotyczących jakości translacji plików analizowano formaty IGES oraz STEP.

Kolejny rozdział przedstawia analizę procesu odwzorowania geometrii łopatki aparatu kierującego turbiny za pomocą metod: współrzędnościowej (stykowej) oraz skanowania optycznego (metoda bezstykowa). Wyniki badań dotyczących błędów pomiaru, przedstawione w tej części pracy zaczerpnięto z publikacji Autora [38, 39]. Dodatkowo zaproponowano algorytm modyfikacji geometrii, zmierzający do zwiększenia dokładności skanowanych części.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie pracy oraz wnioski końcowe o charakterze jakościowym a także kierunki dalszych badań. Całość opracowania kończy spis literatury liczący 114 pozycji. Uważam, że praca zawiera wszystkie składniki typowe dla dysertacji doktorskich. Układ pracy oceniam jako poprawny.

Ocena pracy

Rozprawa zawiera uzasadnienie wyboru tematyki, przegląd literatury a także określa cele i tezę pracy. W rozprawie wskazano lukę badawczą dotyczącą:

- transformacji geometrycznej łopatki aparatu kierującego turbiny, poddanej działaniu wysokiej temperatury,
- transformacji plików CAD do różnych formatów wykorzystywanych w procesie produkcji i kontroli części,
- potrzeby opracowania algorytmu modyfikacji powierzchni uzyskanej na podstawie skanowania optycznego geometrii obiektu.

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć naukowych Autora pracy można zaliczyć:

- zdefiniowanie metody iteracyjnej skalowania (transformacji) łopatki aparatu kierującego, z uwzględnieniem jej odkształceń termicznych,
- stworzenie algorytmu służącego do modyfikacji powierzchni zdefiniowanej w pliku STL,
- weryfikacja ww. algorytmu dotyczącego modyfikacji powierzchni na przykładzie łopatki aparatu kierującego turbiny.

Z analizy treści rozprawy wynika, że Autor posiada umiejętność prowadzenia samodzielnej pracy badawczej oraz potrafi dokumentować wyniki badań. Posiada wiedzę i umiejętności w zakresie implementacji metod komputerowych (w szczególności CAD), które stosowane są powszechnie w wielu branżach przemysłu, w fazie projektowania, produkcji i kontroli wyrobu. Wyniki uzyskane w pracy mają znaczenie przede wszystkim użyteczne i mogą zostać wykorzystane na etapie projektowania, produkcji i kontroli wyrobów.

Oceniając całokształt osiągnięć przedstawionych w pracy stwierdzam, że Autor zbyt ogólnie potraktował analizowane zagadnienia dotyczące trzech odrębnych tematów: transformacji geometrii części gorącej do zimnej (rozdział 3), transformacji geometrii w plikach CAD (rozdział 4) oraz techniki kontroli części za pomocą metody współrzędnościowej oraz metody optycznego skanowania geometrii (rozdział 5). W każdym z ww. rozdziałów Autor podaje założenia wstępne, często podane w formie ogólnej, schemat blokowy oraz wyniki obliczeń. W wielu miejscach brakuje jednak szczegółowych opisów stosowanych procedur, co utrudnia potencjalnemu czytelnikowi śledzenie poszczególnych kroków zmierzających do uzyskania rozwiązania. Uważam, że każdy z trzech wymienionych wcześniej rozdziałów (analizowany w sposób szczegółowy) mógłby być tematem odrębnej rozprawy doktorskiej, natomiast podejście Autora polegające na zbyt ogólnej i powierzchownej analizie trzech niezależnych zagadnień obniżyło poziom naukowy pracy. Biorąc pod uwagę fakt, że praca realizowana była w ramach tzw. doktoratu wdrożeniowego, jej ważnym celem powinna być możliwość zastosowania opracowanej metodyki badań w sferze przemysłowej. Uważam, że Autorowi udało się osiągnąć ten cel, zaś uzyskane wyniki pracy mają znaczenie użyteczne i mogą zostać zastosowane w przemyśle.

Czytając pracę, nasunęło mi się szereg uwag, które wyszczególniam w kolejnym rozdziale

Uwagi szczegółowe

1. W rozdziale 3.2.1 zatytułowanym jako „CAD-CAE loop” Autor wskazuje jako główny składnik schematu blokowego „FEM Iterative Optimization” (rys. 3.1). Skoro metoda elementów skończonych (MES) zdefiniowana jest jako główny moduł procedury transformacji „hot to cold” (rys. 3.1), to w pracy brakuje informacji czy Autor korzystał z własnego kodu MES czy też wykorzystywał komercyjny program. W obu przypadkach należało wskazać jak zbudowany był model, jak zdefiniowano materiał i warunki brzegowe a także jakiej metody użyto do analizy. W pracy nie znalazłem jednak żadnej informacji nt. praktycznej implementacji MES do rozwiązania problemu.
2. W trakcie transformacji geometrii wykorzystano jako obciążenie termiczne jednorodne pole temperatury ($\Delta T=980^{\circ}\text{C}$), co stanowi przypadek uproszczony. W każdym komponencie gorącej części silnika (także w łopacie aparatu kierującego, w szczególności chłodzonej) występuje niejednorodne pole temperatury, które opisywane jest często jako funkcja 3 zmiennych (zwykle definiowana w układzie cylindrycznym). Skoro Autor opracował złożoną procedurę odwrotnej transformacji geometrii części gorącej do części zimnej, to dlaczego nie zdefiniowano niejednorodnego pola temperatury? Rozwiązanie tego problemu w ujęciu MES należy do zadań o umiarkowanym stopniu trudności.
3. Słabym punktem pracy jest jej strona graficzna. Do edycji głównego tekstu pracy użyto czcionki o zbyt małym rozmiarze (zbliżonym do Times New Roman 9) co stwarza duże problemy z odczytem większych fragmentów dysertacji. Na niektórych rysunkach (np. 3.1) tekst jest dodatkowo pomniejszony, przez co zdefiniowany schemat blokowy jest nieczytelny.
4. Na rysunku 3.1 zatytułowanym jako „Engineering variables” nie zaznaczono parametru zmiennej „2d section twist” oraz „2d shrinkage”.
5. W równaniu (3.1) występują parametry z i z_0 , które nie zostały opisane (wyjaśnione) w pracy.
6. Autor nie przedstawił źródła, na podstawie którego zdefiniował stałe materiałowe stopu niklu Inconel 718 (Tab. 3.1).
7. Na rysunku 3.5 nie zaznaczono do jakiej bazy odnosi się wymiar 750 mm.
8. Grupę wykresów na str. 46-47 Autor nazywa w nagłówku jako „Chart 3.1-10” zaś inne wykresy w pracy oznaczane są jako „Fig.” Nielogiczna jest także numeracja 3.1-10.

9. Na rysunkach zamieszczonych w tabeli 4.1 występuje (3 razy) strzałka wskazująca tę samą płaską powierzchnię. Nie rozumiem, w jakim celu zdefiniowano ten element.
10. Rysunek 5.11, przedstawiający fragment łopatki jest niezrozumiały, ponieważ nie opisano co wyrażają poszczególne kolory, widoczne na powierzchni modelu. Podobna sytuacja występuje także na rysunkach 3.6 oraz 5.19.
11. Streszczenie pracy zdefiniowane w języku polskim zawiera niezrozumiałe sformułowanie: „Kształt produkcyjny jest inny i należy go odwrócić w celu dopasowania do odkształceń cieplnych” (str. 8).
12. Na stronie 75 Autor pisze, że stworzył oryginalny kod (program) o długości ok 1000 linii, którego schemat blokowy zamieszczono na rys. 5.18. Program służył do korekty geometrii obiektu, zapisanej w pliku STL. W tabeli 5.8 znajdują się wyniki, uzyskane za pomocą wykorzystania ww. programu, świadczące o jego skuteczności. Dlaczego Autor nie zamieścił treści kodu (jako rezultatów własnej pracy twórczej) w załączniku do dysertacji (np. w formie elektronicznej)?

Podsumowanie i wniosek końcowy

W podsumowaniu stwierdzam, że tematyka rozprawy mieści się w zakresie dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna. Rozprawa zawiera rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników badań w sferze gospodarczej a także potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia prac badawczych przez Kandydata oraz jego ogólny poziom wiedzy teoretycznej. Pomimo wyszczególnionych wyżej uwag natury merytorycznej oraz językowej pracę oceniam pozytywnie.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa pt. „Engineering and inspection problems study for turbine guide van mechanical component” spełnia wymagania określone w art. 187, ustawy z dnia 18 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Marcina Jamontta do publicznej obrony jego rozprawy.