

Dr hab. inż. JAKUB ŁAGODZIŃSKI
Instytut Maszyn Przepływowych PŁ
ul. Wólczańska 217/221, 93-005 Łódź
tel. 042 631 23 87
jakub.lagodzinski@p.lodz.pl

Łódź, 07.09.2023

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Artura Andrearczyka p.t.

Określenie charakterystyk przepływowych i dynamicznych układów wirujących z komponentami wytworzonymi z zastosowaniem metod typu „Additive Manufacturing”

Niniejsza recenzja została opracowana w wyniku decyzji Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN podjętej na posiedzeniu w dniu 15 czerwca 2023 roku. Dokumenty, w tym tekst rozprawy, zostały mi przekazane pismem z dnia 18 lipca 2023.

Lokalizacja pracy w technice

W ostatnich latach przy różnego rodzaju doniesieniach na temat nowinek technicznych coraz częściej słyszy się o wykorzystaniu urządzeń nazywanych potocznie drukarkami 3d. Ich cena na przestrzeni ostatnich lat na tyle spadła, że stały się one przystępne dla osób prywatnych, wykorzystujących te maszyny np. w modelarstwie lub innym hobby. Druk 3d pierwotnie w zastosowaniach komercyjnych był używany jako metoda „rapid prototyping” będąca istotną pomocą w procesie projektowania maszyn i urządzeń. Wraz z rozwojem tej technologii i ze wzrostem wytrzymałości dostępnych materiałów budulcowych, zaczęto wykorzystywać druk 3d do wytwarzania odpowiedzialnych części maszyn mających zastosowanie podczas eksploatacji produktu. Nowoczesne metody wytwarzania takie jak obróbka addytywna pozwalają na wykonywanie elementów o kształtach niedostępnych na drodze odlewania bądź obróbki skrawaniem. Możliwe jest np. wykonanie łopaty śmigła z wypełniaczem o strukturze plastra miodu jako jednolitego elementu, dzięki czemu jest ona lekka i wytrzymała. W niniejszej rozprawie doktorskiej autor podejmuje się wielopłaszczyznowej analizy przydatności technologii druku 3d do wytwarzania wysokoobrotowych kół wirnikowych dla potrzeb turbosprężarek.

Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa liczy 120 stron łącznie z rysunkami w tekście. Obszerny wykaz literatury liczy 156 pozycji. Pracę podzielono na osiem rozdziałów, w tym literatura.

Rozdział pierwszy zatytułowany „wprowadzenie” przybliży czytelnikowi zagadnienia związane z technologią wytwarzania addytywnego, jej ciągłym rozwojem oraz jej zastosowaniem na świecie. Już na wstępie Autor jasno określa obszar prowadzonych badań i swój wkład w rozwój tej technologii skupiając się na jej zastosowaniu do wytwarzania silnie obciążonych elementów maszyn przepływowych.

Tematyka wytwarzania addytywnego zostaje szerzej przedstawiona w rozdziale drugim p.t. „przegląd literatury, obecny stan wiedzy”. Rozdział rozpoczyna się od krótkiego rysunku historycznego, po czym Autor omawia najbardziej rozpowszechnione metody wytwarzania

addytywnego, wskazując przy tym potencjalne możliwości jak również ich ograniczenia. Poszczególne metody opatrzone stosownymi schematami, a z ich opisów można dowiedzieć się, jakie materiały są wykorzystywane i gdzie znajdują zastosowanie (przemysł motoryzacyjny, protetyka i inne). Pod koniec rozdziału Doktorant przechodzi do przeglądu literatury naukowej odnoszącej się do zastosowania metod wytwarzania addytywnego w maszynach wirnikowych.

W rozdziale trzecim Autor formułuje cel i zakres pracy, a mianowicie określenie zakresu zastosowania metod addytywnego wytwarzania na etapie projektowania, optymalizacji oraz badań eksperymentalnych maszyn przepływowych. Rozważaniom poddawana jest przydatność metody o nazwie Multi Jet Printing cechującej się wysoką precyzją i relatywnie wysoką wytrzymałością wykonywanych elementów.

Rozdział czwarty po krótko opisuje programy użyte w analizach numerycznych geometrii modelu, narzędzia wykorzystane na etapie druku 3d kół wirnikowych oraz aparaturę pomiarową wykorzystaną podczas badań stanowiskowych.

Rozdział piąty stanowi obszerną analizę właściwości materiałowych polimeru użytego w procesie druku 3d. Autor dokonuje wstępnej selekcji dostępnych materiałów pod kątem granicy wytrzymałości. Następnie dostarczone przez producenta dane materiałowe weryfikuje w oparciu o wyniki testów zrywania na maszynie wytrzymałościowej własnoręcznie przygotowanych próbek. Badania rozszerzono również o wpływ kierunku druku względem działającej na próbkę siły rozciągającej. W dalszej części rozdziału piątego zostały przedstawione badania próbek polimerowych z zatopionymi w nich siatkami Bragga. Próbkę zostały następnie umieszczone w komorze środowiskowej i poddane działaniu zmiennej temperatury oraz wilgotności wewnątrz tejże komory, przy czym badano wpływ czynników środowiskowych na odkształcenia polimeru. W kolejnym etapie próbki poddano zrywaniu na maszynie wytrzymałościowej stwierdzając znikomy wpływ obecność światłowodu na granicę wytrzymałości polimeru.

Badania z wykorzystaniem siatek Bragga przyniosły ciekawe wyniki, jednakże można odnieść wrażenie, iż nie wnoszą one istotnych informacji do rozprawy i podrozdział ten mogłyby zostać pominięty bez zauważalnego pogorszenia odbioru pracy. Z drugiej strony, autor mógłby się pokusić o wykonanie prób wytrzymałościowych właśnie przy zmiennej temperaturze i wilgotności otoczenia, ale podejrzewam, że nie było to technicznie możliwe.

Rozdział szósty poświęcono analizom numerycznym, dotyczącym wytrzymałości stworzonych kół wirnikowych, jak również symulacjom przepływu powietrza przez stopień sprężarkowy. Przeprowadzone analizy posłużyły jako predykcyjny punkt odniesienia dla przeprowadzanych badań eksperymentalnych, które szeroko omówiono w rozdziale siódmym.

Rozdział siódmy stanowi trzon rozprawy i jest on znacznie rozbudowany. Rozpoczyna się od przedstawienia stanowiska badawczego modelowej turbosprężarki, opatrzonego stosownymi zdjęciami, rysunkami i schematami. Autor opisuje działania przygotowawcze takie jak wyważanie rotora i kalibrację czujników pomiarowych. Ponadto zostało również omówione oprogramowanie służące do sterowania stanowiskiem badawczym i do akwizycji danych.

Po wprowadzeniu, autor prezentuje otrzymane wyniki badań z różnych zagadnień związanych z eksploatacją turbosprężarki wyposażonej w polimerowe koło kompresora. Badania stanowiskowe objęły m.in.:

- porównanie charakterystyk przepływowych koła wykonanego z polimeru i oryginalnego ze stopu aluminium jako geometrii odniesienia. Wyniki pomiarów porównano z charakterystykami otrzymanymi na drodze analiz numerycznych.
- analizę dynamiki rotora i reprezentację otrzymanych danych w postaci widm FFT
- Badania niszczące koła z wykorzystaniem szybkich kamer dla uchwycenia momentu pęknięcia i jego propagacji.
- Badania charakterystyk nowo zaprojektowanej tarczy sprężarki dostosowanej do nowego punktu pracy

Dysertacja jest zakończona podsumowaniem wyników prac (rozdział ósmy) zawierającym ponadto zarys dalszych kierunków prac nad wykorzystaniem wytwarzania addytywnego w maszynach przepływowych.

Uwagi krytyczne, redakcyjne oraz pytania do doktoranta

Wymaga podkreślenia fakt, iż przygotowanie rozprawy o tak szerokim spektrum zagadnień związanych z zaprojektowaniem, wykonaniem i przetestowaniem wirników sprężarek wykonanych z polimerów na drodze druku 3d wymagało znacznego nakładu czasu i pracy. Przy tak obszernej pracy nie udało się uniknąć pewnych błędów redakcyjnych, niejasności bądź nietrafnych sformułowań:

- Pracę napisano w j. polskim natomiast na Rys 2.3, Rys 5.5 i Rys od 6.6 - 6.11 pozostawiono opisy w j. angielskim
- Str. 16 „... drukarek typu inkjet (biurowych)...” autor miał raczej na myśli drukarki atramentowe
- Str. 42 „... zejście z temperatury 10°C do 50°C z krokiem co 5°C...” pominięcie w tym zdaniu znaków ujemnych wprowadza czytelnika w zagmatwanie.
- Str. 45 „...M3 X... jest materiałem lepszym...” zapewne autor miał na myśli, że polimer M3 X jest materiałem bardziej odpowiednim do produkcji kół wirnikowych
- Str. Rys 6.4 analizowane koło sprężarki jest wirującym elementem osiowosymetrycznym zatem lepszym sposobem przedstawienia rozkładu przemieszczeń byłaby jego reprezentacja w oparciu o biegunowy a nie kartezjański układ współrzędnych, z podziałem na przemieszczenia obwodowe i promieniowe.
- Str. 51 „... W rezultacie otrzymuje się wzrost gęstości energii...” zapewne autor miał na myśli przyrost mocy jednostkowej silnika w wyniku zastosowania turbosprężarki.
- Str. 56 w ostatnim akapicie rozdziału 6.2 autor sugeruje jakoby model numeryczny stanowił punkt odniesienia i weryfikacji dla obiektu rzeczywistego jakim jest turbosprężarka na stanowisku badawczym. W praktyce to raczej model jest na tyle dobry, na ile wiernie odwzorowuje obiekt rzeczywisty.
- Str. 77, Rys 7.6 – niejasne oznaczenie osi XYZ na zdjęciu stanowiska
- Str. 83, Rys. 7.21 i jego przybliżenie na Rys. 7.22 to reprezentacja tych samych danych co 7.17, przy czym zamiast dziedziny rzędów mamy dziedzinę częstotliwości.
- Str. 93 – 96 Na Rys. od 7.31 do 7.34 przedstawiono porównanie charakterystyk przepływowych otrzymanych na drodze eksperymentalnej i w wyniku analiz

numerycznych. Autor jako metodę porównawczą wykorzystuje kąty między krzywymi co z punktu widzenia analizy wykresów jest założeniem błędnym, ponieważ nie wiadomo, jak wyznaczono położenie ramion kątów. Powinno się raczej wyprowadzić styczne do krzywych dla określonej wydajności ale nadal pozostaje pytanie, co na tej podstawie można wywnioskować.

Błędy literowe zauważone w tekście:

- Str. 23 ostatni wiersz większą opłacalności (powinno być: większą opłacalność)
- Str. 27 wiersz trzeci FDM frimy (firmy)
- Str. 67 Interfejs aplikacji (jest aplikaci)

W trakcie analizy pracy nasunęło się kilka pytań, które kieruję poniżej do doktoranta:

- Str. 80 „...ta wysoka częstotliwość jest wielokrotnością częstotliwości związanej z drganiami łożysk ślizgowych (8x0,5X), nie można jej przypisać żadnemu ruchomemu elementowi stanowiska badawczego” czy autor analizował możliwy wpływ otworków zasilających w pierścieniach pływających wewnątrz łożysk ślizgowych?
- Na str. 92 pada stwierdzenie „stabilizacji pomiaru”. Co ono oznacza?
- str. 92 co autor rozumie pod użytym stwierdzeniem „...charakter pracy sprężarki jest typowy”?
- W rozdziale 7.3.2 autor prezentuje wyniki badań niszczących otrzymanych na drodze odwirowania wydrukowanego koła aż do momentu jego rozerwania na skutek siły odśrodkowej. Przy użyciu szybkiej kamery zobrazowano sam moment rozerwania (na Rys. 7.36) z inicjacją pęknięcia w pobliżu otworu środkowego tarczy. Następnie autor porównuje otrzymane wyniki z rozkładem naprężeń otrzymanym na drodze analizy numerycznej. Natomiast na rys. 6.3 obrazującym rozkład naprężeń zredukowanych (von Misesa) można zaobserwować ich koncentrację w miejscu połączenia łopatki z tarczą, bliżej jej krawędzi spływu. Jak można wyjaśnić te rozbieżności pomiędzy modelem numerycznym a obiektem rzeczywistym?

Ostateczna ocena pracy

W opisie pracy skoncentrowałem się na zauważonych przeze mnie możliwościach dalszej poprawy jakości badań, ich rozszerzenia i na zauważonych wcześniej błędach. Przedstawione, nieliczne uwagi krytyczne nie podważają wysoce pozytywnej oceny rozprawy, a doktorant zrealizował postawione cele. Do podstawowych zalet rozprawy pod względem wyboru opracowanego materiału, sposobu jego prezentacji oraz badawczego wkładu Autora zaliczam:

- Dobry przegląd literatury i aktualnego stanu technologii z tematyki rozprawy
- Gruntowne rozpoznanie analizowanej technologii wytwarzania pod kątem materiałoznawstwa i wytrzymałości materiałów
- Zaprojektowanie i zbudowanie nowoczesnie wyposażonego stanowiska badawczego
- Przeprowadzenie pracochłonnych prac laboratoryjnych i warsztatowych związanych z kalibracją i cechowaniem licznych torów pomiarowych i sterujących

- Przeprowadzenie szeroko zakrojonych badań eksploatacyjnych turbosprężarki z polimerowym kołem kompresora
- przejrzyste opracowanie i prezentacja wyników badań zarówno eksperymentalnych jak i analitycznych.

Recenzowana rozprawa doktorska świadczy o szerokiej wiedzy mgr inż. Artura Andrearczyka z zakresu technologii wytwarzania addytywnego, maszyn przepływowych, układów pomiarowych i analiz numerycznych. Należy tu podkreślić fakt, że praca została napisana w sposób klarowny, na wysokim poziomie edycyjnym. W szczególności dobrze oceniam umiejętności Autora jako badacza – eksperymentatora. Praca świadczy o dobrym przygotowaniu Doktoranta do samodzielnych badań.

Wniosek końcowy

Po przeprowadzeniu oceny pracy doktorskiej p. mgr inż. Artura Andrearczyka, zatytułowanej „Określenie charakterystyk przepływowych i dynamicznych układów wirujących z komponentami wytworzonymi z zastosowaniem metod typu „Additive Manufacturing” stwierdzam, że praca doktorska spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane takim rozprawom i w związku z tym może być dopuszczona do publicznej obrony.

Na tym recenzję zakończono

Łęgodziński