

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej *mgr inż. **Mateusza Kielbickiego***
pt. „Metodyka projektowania i wytwarzania systemów mocowań przyrządów
spawalniczych wytwarzanych technikami przyrostowymi dla przemysłu
lotniczego”

Wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, Wydziału Budowy Maszyn
i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z dnia 27 listopada 2025 r.

1. Tematyka, problemy naukowe podjęte w rozprawie, ich oryginalność oraz znaczenie dla nauki i praktyki

Przedstawiona do recenzji praca, napisana została pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Grzegorza Budzika, na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Promotorem pomocniczym pracy jest dr inż. Joanna Woźniak. Prezentowana praca, wykonana została w ramach doktoratu wdrożeniowego realizowanego w firmie Pratt & Whitney, która to firma, jest w szczególności producentem podsystemów ukierunkowanych na szeroko pojęty przemysł lotniczy.

Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów; załączono także wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów. W całości zawarto ją na 129 stronach. W bibliografii, autor przedstawił 184 trafnie dobrane pozycje literaturowe.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Mateusza Kielbickiego, należy do prac z zakresu teorii projektowania, a istotnym celem było określenie poprawności przyjętych założeń, potwierdzonych badaniami eksperymentalnymi. Autor podjął w niej problematykę związaną z opracowaniem metodyki projektowania i wytwarzania systemów mocowań przyrządów spawalniczych wytwarzanych technikami przyrostowymi, przede wszystkim dających się zastosować (spełniających odpowiednie standardy) w przemyśle lotniczym.

Doktorant zaproponował przeprowadzenie badań zarówno teoretycznych (w szczególności symulacyjnych) jak też potwierdzenie ich na drodze doświadczalnej.

Autor w rozdziale pierwszym zaakcentował problematykę i potrzebę zajęcia się problemem, oraz (na tle innych) zaprezentował obszar przemysłu, którym się zajmuje. W tym samym rozdziale, zaakcentowano problemy technologiczne jakie powinny być uwzględnione w przypadku tworzenia prototypów czy w następstwie tego konkretnych narzędzi i komponentów wykorzystywanych w przemyśle lotniczym. Dokonano także opisu procesu projektowania uwzględniającego wymagane parametry oraz pewną lukę, którą autor pracy proponuje w sposób naukowy rozwiązać.

Kolejny, drugi rozdział poświęcony jest przybliżeniu problematyki związanej z opisem i analizą stanu zagadnienia. Omówiono w nim czynniki procesu konstruowania oprzyrządowania, które są charakterystyczne, a jednocześnie problematyczne w sensie kosztów wykonania z jednoczesnym spełnieniem wymogów tolerancji wymiarowych. Wysokie normy i standardy obowiązujące w szeroko rozumianej gałęzi powiązanej z przemysłem lotniczym są wyznacznikiem i wyznaczają wymagania dla projektowanych narzędzi wspomagających procesy obróbkowe. Zawarto w nim także analizy opisujące różne rodzaje systemów mocowań, będących w zainteresowaniu autora pracy. Dokonano przy tym krótkiego podsumowania każdej z metod, wskazując w szczególności na wady ich wykorzystania w zależności od przyjętego procesu technologicznego. Zaprezentowano tu przykłady różnych uchwytów opartych na zmiennofazowym systemie mocowań, adaptacyjnych, kontrolno-pomiarowych czy hybrydowych z mechaniczną zdolnością ich adaptacji. W tym również rozdziale, doktorant płynnie zaakcentował główny problem będący elementem jego późniejszych zainteresowań jakim jest projektowanie systemów mocowań przyrządu/przyrządów spawalniczych przy użyciu technik przyrostowych. Doktorant w sposób prawidłowy dokonał analizy literatury dotyczącej wykorzystania technik przyrostowych w przemyśle. Wskazał istotne zalety jak również ograniczenia ich zastosowań w produkcji oprzyrządowania spawalniczego. W prezentowanym rozdziale, przedstawił także ogólny opis stosowanych metod i rodzajów spajania i procesów spawalniczych. Szczegółowa analiza prezentowanych rodzajów i metod procesów przyrostowych, pozwoliła doktorantowi dokonać podsumowania i analizy obecnego stanu wiedzy wskazując na implementacje technologii addytywnych w produkcji narzędzi w szczególności jako oprzyrządowanie spawalnicze.

Rozdział trzeci to jasno określone rozpatrywane zagadnienie naukowe w postaci tezy rozprawy doktorskiej opisującej główne cele pracy oraz jej zakres. Zawiera on jednocześnie konkluzję dotyczącą problemów, które na podstawie eksperymentów i symulacji numerycznych należy rozpoznać, a które są bezpośrednio powiązane opracowaniem metodyki i wytwarzania mocowań przyrządów spawalniczych wytwarzanych technikami przyrostowymi. Doktorant przedstawia tu także przebieg procesu badawczego w formie jasno sprecyzowanych przyjętych etapów badawczych. Z uwagi na to, że prezentowana praca jest wynikiem doktoratu wdrożeniowego, doktorant jako nieodzowną jego część zaprezentował obszar przemysłu, ale także konkretne przedsiębiorstwo, w którym realizuje proces badawczy i wdrożeniowy

Aby uzyskać założony cel, konieczne było zidentyfikowanie i zbadanie zjawisk zachodzących w przyjętym założeniu. Kolejny, czwarty rozdział prezentuje zatem wyniki modelowania z wykorzystaniem programów 3D-CAD (w tym konkretnym przypadku CATIA V5). Wykorzystano tu modelowanie konkretnego opracowanego modelu dla typowych stosowanych w podobnych rozwiązaniach (stosowanych w przemyśle) elementach konstrukcyjnych. Oprócz zamodelowania samych elementów badawczych, doktorant zwracał szczególną uwagę na zapewnienie (wymaganej w przemyśle lotniczym) odpowiedniej precyzji ich późniejszego montażu w odpowiednich uchwytach.

Istotnym elementem pracy jest opracowanie prototypu technologicznego, a następnie wykonanie prototypu technicznego uchwytu. Dało to podstawę do dalszych analiz i wniosków w celu uzyskania ostatecznego produktu. Stwierdzono tu m.in., że zastosowanie technologii SLS (do wykonania prototypu technologicznego) pozwoliła na dokładne odwzorowanie kanałów wewnętrznych, a przez to także dokładnych analiz technologicznych. Wydaje się jednak, że zabrakło omówienia tych analiz. W przypadku wykonania prototypu technicznego, doktorant wyraźnie potwierdził znajomość stanu zagadnienia. W dalszej części dokonano przeprowadzenia badań symulacji dotyczących rozkładu temperatur oraz rozwiązania zagadnień wytrzymałościowych (przy użyciu MES). Co prawda zamieszczono zrzut ekranu z symulacji wybranego badania (rys. 4.20 oraz 4.21), jednak brakuje tu zaprezentowania przynajmniej jednego pełnego rozwiązania opracowywanego zagadnienia. Sam proces

kolejnych czynności dla uzyskania parametrów dla dalszych założeń przebiegał w sposób jak najbardziej prawidłowy.

W dalszej części pracy przeprowadzono testy laboratoryjne, które umożliwiły m.in. bardziej precyzyjne kontrolowanie zmiany parametrów termicznych rozpatrywanego obiektu.

W rozdziale 5 doktorant zaprezentował na bazie modelu referencyjnego modele, które posłużyły do zdefiniowania eksperymentalnej metodyki analizy symulacyjnej ich pracy. Istotnym rozwiązaniem zastosowanym w pracy było to, że prezentowane modele badawcze były zaprojektowane w taki sposób, aby możliwy był ich wydruk przy użyciu technik przyrostowych. Zaprezentowane symulacje rozkładu temperatur wykonane z użyciem środowiska ANSYS, pozwoliły autorowi uzyskać wybór odpowiedniego rodzaju uchwytu spełniającego zakładane w pracy cele. Podobnie, przeprowadzono dalsze symulacje związane z badaniem wytrzymałościowym poszczególnych struktur.

Istotną część pracy stanowią badania laboratoryjne, w których doktorant starał się potwierdzić wcześniejsze analizy symulacyjne. Uzyskane efekty potwierdziły w sposób jednoznaczny wybór odpowiedniego rodzaju uchwytu. W dalszej części, przeprowadzono badania w warunkach rzeczywistych. Zweryfikowano poprawność przyjętych założeń w warunkach przemysłowych (produkcyjnych). Ta część pracy stanowi potwierdzenie części wdrożeniowej pracy doktorskiej Pana mgr inż. Mateusza Kiełbickiego.

Bardzo pozytywne wrażenie robi zakres podjętych przez doktoranta prac doświadczalnych. Oprócz badań związanych z opracowaniem założeń koncepcyjnych i opracowaniem modeli CAD-owskich, przeprowadził on w sposób prawidłowy ocenę i analizę wykonanych prototypów z uwzględnieniem zarówno ich technologiczności jak i odpowiedniej struktury uwzględniającej układ chłodzenia kanałowego. Zaprojektował i wykonał prototyp technologiczny w którym m.in. zweryfikował jakość geometryczną kanałków chłodzących, za pomocą odpowiednich testów przepływowych. Dodatkowo przeprowadzono próby przemysłowe na wydziale produkcyjnym, z uwzględnieniem odpowiednich wymogów technologicznych obowiązujących m.in. w przemyśle lotniczym.

Wyraźnie zauważyć można duże zaangażowanie doktoranta oraz połączenie wiedzy i umiejętności praktycznych w rozważaniu rozpatrywanych problemów. Pomimo pewnych niedociągnięć pracy, podkreślić należy dopełnienie wszelkich elementów prawidłowo prowadzonego procesu badawczego. Doktorant dokonał szeregu badań zarówno modelowych jak również wykorzystując konkretne (wykonane na ich podstawie wyników prowadzonych analiz) demonstratory.

2. Ocena źródeł i stanu wiedzy w obszarze związanym z tematyką pracy

Autor dokonał prawidłowego przeglądu literatury, dokonał odpowiedniej oceny źródeł obszaru związanego z tematyką pracy (w tym literatury światowej). W pracy oparto się o 184 pozycje literaturowe (również z ostatnich kilku lat). Określono w sposób poprawny stan wiedzy dotyczący możliwego zastosowania przeprowadzonych badań w przemyśle, co świadczy o dostatecznej wiedzy autora na podejmowany temat. W sposób jasny i przekonujący sformułowano wnioski dotyczące zastosowanych źródeł literaturowych. Doktorant wykazał się jednocześnie oryginalnością w ocenie swoich badań w stosunku do istniejących w rozpatrywanej dziedzinie. Jednocześnie wykazał prawidłowy, aczkolwiek taki, który można byłoby poszerzyć, dobór technik badawczych.

3. Uwagi merytoryczne i edytorskie

Praca, według mojej opinii, nie zawiera istotnych uwag merytorycznych dla prac typu doktorat wdrożeniowy. Pewne wskazane przeze mnie do ewentualnego zastosowania zagadnienia, dotyczą analiz i wniosków, które doktorant może uwzględnić w swojej przyszłej pracy naukowej. Czytając pracę odnosi się wrażenie, że wiele istotnych fragmentów, które można byłoby zawrzeć w treści rozprawy, jest w domyśle. Odczuwa się brak wyjaśnienia procesu wnioskowania w wielu stwierdzeniach zawartych w niektórych rozdziałach.

Pomimo tego, że autor wykazał się dużą starannością edytorską pracy, to nie uniknął błędów, które zresztą nie wpływają w znaczącym stopniu na jej treść merytoryczną czy ocenę końcową, a w szczególności na efekt praktyczny – wdrożeniowy.

W części edytorskiej, dobrze byłoby zastosować odpowiedni spis rysunków i tabel, który dodatkowo dałby możliwość większego komfortu dla osoby czytającej pracę.

Wśród istotnych uwag szczegółowych wyróżnić można następujące:

Str. 79 – w rozdziale 5 dotyczącym symulacji za pomocą MES, w podrozdziale 5.2.1. omówiono etap badań, które miały potwierdzić prawidłowość uzyskanych wyników. Zgodnie ze stwierdzeniem wyrażonym przez autora, dokonano symulacji rozkładu ciepła zaprojektowanego uchwytu dla dwóch stanów: po spawaniu w stanie swobodnym oraz z wymuszonym wewnętrznym obiegiem cieczy chłodzącej. Wydaje się, że doktorant miał na myśli rozkłady temperatur a nie ciepła. Są to dwa różne pojęcia. Ponadto, podrozdział 5.2.1.1 *Chłodzenie swobodne* (str. 80) rozpoczyna się bezpośrednio rysunkami, nie poprzedzonymi żadnym opisem. Jest to co prawda bezpośrednie odniesienie do rozdziału głównego, jednak jeśli autor zdecydował się zawrzeć odpowiednie analizy w odrębnym podrozdziale, to z edytorskiego punktu widzenia, powinno być przynajmniej ogólne wprowadzenie opisowe do prezentowanych rysunków.

Str. 86, 87, 101 – „literówki” – kolejno powinno być: powietrzu a nie powietru; radiatorów a nie radiatorów; grzałka a nie grzałka.

Dobrze byłoby, aby opisując w tym rozdziale ogólne założenia przyjętych modeli badawczych (dla symulacji z użyciem MES), autor doprecyzował, jak rozumie opisywane symulacje dla uchwytów kolejno: wersji 1, wersji 2, wersji 3. Czym różnią się poszczególne uchwyty ? Z wcześniejszego, bardzo ogólnego opisu wynika, że rodzajem kanałów chłodzących. Czy dobór średnicy (a w zasadzie przyjęta jedna średnica) był podyktowany jedynie procesem technologicznym ? Czy autor próbował wykonać symulacje dla różnych średnic i w ten sposób zoptymalizować „jakość” procesu chłodzenia ? Co było podstawą przyjęcia i zastosowania konkretnego kanału chłodzącego ?

Szkoda, że na końcu rozdziału 5.2.1., doktorant nie dokonał tabelarycznego porównania zmian temperatur dla poszczególnych wersji uchwytów. Znacząco przyczyniłoby się to do zwiększenia przejrzystości analizy wyników.

W rozdziale 4 dotyczącym opracowania modelu badawczego i prototypu koncepcyjnego, zabrakło bardziej opisanego rodzaju wnioskowania przeprowadzonego przez doktoranta. Niedosyt niosą „suche” stwierdzenia typu: „*Elementy montażowe wraz z kołnierzem i rurką zostały poddane dalszym badaniom*” – str. 56. Brakuje tu dalszej części wyjaśniającej wskazanie choćby ogólnego kierunku tych badań, a także celu z którego to wynika. Ponadto, samo opracowanie modelu wymagałoby wyjaśnienia przyjętych (choćby ogólnych) warunków brzegowych powiązanych zarówno z opracowywaną konstrukcją jak

również potencjalnym wykorzystaniem zaprojektowanego elementu. Znowu przytoczyć tu można zdanie zawarte w pracy, które jest bardzo ogólne: „...*Proces modelowania oraz złożenia wszystkich elementów pozwolił na dokładne dopasowanie i uniknięcie ewentualnych niezgodności...*”. Doktorant nie wyjaśnia jakiego rodzaju „niezgodności” rozpatruje. Podobnie, pewien niedosyt niesie brak wyjaśnienia, co doktorant brał pod uwagę opracowując prototyp numeryczny modelu (w rozdziale 4.3). Stwierdzenie, że *opracowano w środowisku programowym model pozwalający na przeprowadzenie wizualizacji oraz symulacji termicznych i obciążeniowych*, wydaje się bardzo ogólny. Dobrze byłoby zastosować tu pewne (choćby uproszczone) założenia i obliczenia termodynamiczne i wytrzymałościowe, które wstępnie potwierdziłyby lub wykluczyły dany rodzaj przyjętych do późniejszego modelowania założeń. Skąd np. określano różne średnice kanałów chłodzących, które następnie zastosowano w badaniach symulacyjnych. Czy było to wstępnie zweryfikowane? Co prawda doktorant opisuje, że warunki brzegowe związane z obciążeniami termicznymi zostały wyznaczone na podstawie badań eksperymentalnych prowadzonych w Pratt&Whitney Rzeszów, ale nie podaje co było ich podstawą. Wyjaśnienie prowadzonych w środowisku ANSYS symulacji z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych, stanowią interesujący z punktu widzenia badawczego materiał, jednak byłyby bardziej przejrzyste, gdyby ich opis i wnioskowanie było mocniej wypuklone. W rozdziale dotyczącym opracowania prototypu technologicznego, doktorant nie wyjaśnił w jaki sposób potwierdził on, że technologia SLS jest odpowiednim narzędziem do tworzenia prototypów o skomplikowanej geometrii wewnętrznej czy związanego z technologicznością konstruowanego elementu.

Czy w pracy autor uwzględnił rodzaj przepływu (tzn. laminarny i turbulentny)? Wydaje się, że byłoby to istotne z punktu widzenia intensywności, ale także poprawności procesu chłodzenia. Dodatkowo, doktorant pisze o wyborze optymalnej geometrii kanałów uchwytu, nie omawiając na czym ona polega. Na uwagę zasługuje jednak fakt wykonania nie tylko symulacji, ale rzeczywistych demonstratorów, za pomocą których można było w późniejszej fazie testować zaprojektowany system chłodzenia.

W rozdziale 5.2.2 Symulacje wytrzymałościowe – doktorant nie przedstawił opisu w jaki sposób generowano obciążenie – podane jest jedynie maksymalne ciśnienie równe 0,3 MPa. Jak należy rozumieć *maksymalne obciążenie generowane przez chłodnicę*? W jaki sposób i dlaczego określono wartość maksymalną ciśnienia równą 0,3 MPa? To samo

dotyczy analiz naprężeniowych – jak autor rozumie naprężenia maksymalne występujące w poszczególnych uchwytach ?

Ogólna uwaga podsumowująca pracę, jest taka, że przy analizie wyników i wnioskowaniu końcowym (w poszczególnych rozdziałach) brakuje szczegółowego opisu co konkretnie i jakie kierunki badań wyznacza doktorant (wynikające z uzyskanych analiz) na przyszłość. W pracy zastosowano stwierdzenie mówiące o istnieniu zależności danych badawczych, bez wskazania jakich konkretnie. Dobrze byłoby, aby wskazane we wnioskach końcowych dalsze badania były bardziej konkretne – wynikające z uzyskanych przez doktoranta szczegółowych wyników i analiz. Jeśli np. doktorant podkreśla konieczność wykonania różnych konfiguracji wewnętrznych kanałów chłodzenia, to jakie konkretnie i dlaczego – z czego to wynika ? Czy sugerowane przekroje (okrągłe, trapezowe, prostokątne itp.) wynikają z konkretnych analiz czy jedynie z ogólnych spostrzeżeń autora ? Czy sugerując wykorzystanie w przyszłości innych materiałów, dokonano bardziej szczegółowej analizy np. konstrukcyjnej, ekonomicznej czy wytrzymałościowej ?

4. Ocena strony redakcyjnej

Praca wydana starannie. Nie budzi żadnych zastrzeżeń pod względem redakcyjnym. Zdarzają się co prawda pewne pomyłki językowe (literówki), jednak nie mają one większego wpływu na ocenę ogólną strony redakcyjnej.

5. Wnioski końcowe

W świetle wszystkich przytoczonych argumentów, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska **mgr inż. Mateusza Kiełbickiego** pt. „Metodyka projektowania i wytwarzania systemów mocowań przyrządów spawalniczych wytwarzanych technikami przyrostowymi dla przemysłu lotniczego” jest rozwiązaniem zaprezentowanego w niej zagadnienia naukowego i spełnia (zgodnie z ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz.U. 2024 poz. 1571 z późn. zm.)) wymagania stawiane pracom doktorskim, w szczególności realizowanym jako doktorat wdrożeniowy. **Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów procedury przewodu doktorskiego.**

Artur Beijer