

RECENZJA

rozprawy doktorskiej płka mgr inż. Tomasza Zahorskiego nt.
„Analiza możliwości wykorzystania druku 3D w wytwarzaniu i naprawie sprzętu lotniczego”

Niniejszą recenzję opracowano na zlecenie Koordynatora Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Federacji Akademii Wojskowych dra hab. inż. Andrzeja Komorka, prof. LAW
– pismo z dnia 12 kwietnia 2022 r.

1. Ogólna, formalna charakterystyka pracy

Recenzowana rozprawa została przedstawiona na 129 stronach maszynopisu i zawiera poza spisem treści, wykazem ilustracji i tabel:

- wprowadzenie, w którym Doktorant dokonał przeglądu literatury dotyczącej: historii technologii wydruku przestrzennego, charakterystyki wybranych technologii wydruku oraz zdefiniował obszary wykorzystania tej technologii.

- rozdział drugi zawierający hipotezę, cel i zakres pracy,

- rozdział trzeci opisujący metodykę wykonywanych badań eksperymentalnych oraz wyniki testów doraźnych (wytrzymałość doraźna, moduł Younga) i testów udarowości materiałów wykonywanych techniką druku 3D. W rozdziale zaprezentowano również przykładowe tomogramy analizowanych materiałów,

- rozdział czwarty, w którym przedstawiono elementy i strukturę wykonanej bazy danych,

- rozdział piąty zawierający przykład wykorzystania techniki druku 3D w procesie wytwarzania końcówki narzędzia

- podsumowanie i wnioski z wykonanej pracy,

- wykaz cytowanej literatury, zawierający 45 pozycji.

2. Ocena tematu i zakresu pracy

W przedłożonej pracy Doktorant analizował temat dotyczący wykorzystania technologii druku przestrzennego jako alternatywy dla innych technologii związanych z wytwarzaniem części zapasowych do statków powietrznych eksploatowanych w tzw. warunkach polowych

(eksploatacja statków powietrznych poza bazami lotniczymi w warunkach deficytu czasowego i ograniczonego dostępu do części zapasowych).

Technologia wytwarzania części metodą drukowania jest znana od kilkudziesięciu lat, natomiast w ostatnich latach jest intensywnie rozwijana m.in. ze względu na dostępność urządzeń drukujących. Wykorzystanie w pierwszej kolejności jako materiału do druku tworzyw sztucznych powodowało, że technologia była wykorzystywana przede wszystkim do tzw. prototypowania części, czyli wytwarzania w krótkim czasie części o złożonych kształtach, które nie były produktem docelowym (choćby ze względu na bardzo niskie właściwości wytrzymałościowe wykorzystywanych w druku tworzyw i produktów końcowych), ale produktem pośrednim wykorzystywanym w demonstratorach technologii. Dopiero wprowadzenie do druku proszków metali i drukarek do spajania proszków było przełomowym momentem, kiedy pojawiła się realna szansa wytwarzania elementów konstrukcyjnych do statków powietrznych. Istotną przesłanką za wytwarzaniem części technologiami przyrostowymi są również niższe koszty części drukowanych z proszków metali. W tym kontekście prezentowane wyniki licznych badań eksperymentalnych, w których materiał ma wytrzymałość na poziomie kilkudziesięciu MPa (czyli jeden rząd wielkości mniejszy niż np. polimerowe materiały kompozytowe wykorzystywane w elementach statków powietrznych) nie należy traktować jako faktyczną propozycję dla obecnie eksploatowanych statków powietrznych, co sugeruje Autor, ale jako prezentację możliwości technologii przyrostowej. Należy oczywiście docenić bardzo szeroki zakres badań eksperymentalnych, w których analizowano wpływ wielu parametrów technologicznych na właściwości wytrzymałościowe końcowego produktu.

Praca została przygotowana na bazie licznych badań eksperymentalnych realizowanych w wielu etapach, w oparciu przede wszystkim o tworzywa sztuczne. Jako demonstrację możliwości technologii przyrostowej na bazie proszków metali powielono i wykonano bit wykorzystywany w narzędziach obsługowych samolotu F-16. Doktorant przeprowadził badania eksperymentalne w celu zdefiniowania czynników technologicznych i organizacyjnych (m.in. dostawca materiałów, producent drukarki), które mają wpływ na wytrzymałość doraźną materiału oraz na jego udarność. Ponieważ technologie przyrostowe, w porównaniu do innych technologii wytwarzania części maszyn, są rozwiązaniami nowymi można uznać, że wykonana w szerokim zakresie analiza czynników wpływających na parametry wytrzymałościowe i użytkowe (udarność) jest celowa i pożyteczna.

Rozdziały związane z przygotowaną bazą danych czy aplikacją o charakterze eksperckim PrintParts 3D należy traktować jako prezentację możliwości współczesnych systemów

informatycznych w zakresie praktycznego zarządzania dużą liczbą danych m.in. na potrzeby napraw statków powietrznych. Należy się domyślać, że w zamyśle Doktoranta ta część rozprawy doktorskiej nie miała być elementem opracowania o charakterze naukowym czy badawczym, ale raczej utylitarnym.

3. Ocena rozprawy

Do podstawowych zalet rozprawy pod względem wyboru metod i zakresu badań, opracowania i prezentacji wyników oraz badawczego wkładu Doktoranta zaliczam:

- a) podjętą tematykę – ponieważ tzw. technologie przyrostowe (addytywne) są obecnie intensywnie rozwijane i opracowania o charakterze badawczym są cennym uzupełnieniem wiedzy o materiałach wytwarzanych w ten sposób,
- b) opracowanie rozbudowanego planu realizacji badań eksperymentalnych,
- c) wieloaspektowe i wieloetapowe eksperymentalne badania porównawcze materiałów wytwarzanych technologią przyrostową,
- d) zdefiniowanie czynników technologicznych, które mają wpływ na końcowe parametry wytrzymałościowe (wytrzymałość doraźna) i użytkowe materiału,

Doktorant powołuje się na 45 publikacji w tym ok. 30 % stanowią odwołania do stron internetowych o charakterze informacyjnym, co jest dość skromną liczbą w wypadku pracy doktorskiej. Analiza literatury jest przeprowadzona dość dobrze, ale dotyczy przede wszystkim informacji o historii rozwoju technologii przyrostowej i jej zaletach. Moim zdaniem brakuje w opracowaniu problematyki eksploatacji statków powietrznych w zakresie ich napraw m.in. w warunkach polowych, co byłoby uzasadnione następnym rozdziałem, w którym bez „płynnego przejścia” czytelnika trochę zaskakuje postawiona hipoteza i cele badawcze pracy.

Recenzowana praca wnosi oryginalny wkład w rozwój inżynierii mechanicznej, za który uważam zdefiniowanie czynników technologicznych i organizacyjnych, które mają wpływ na wytrzymałość doraźną i udarność drukowanego materiału. Przedstawiona praca, w tym liczba wykonywanych testów z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi pomiarowych (np. tomografy komputerowe), świadczy o dobrym przygotowaniu Doktoranta do planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych, co stanowi podstawę do samodzielnego wykonywania dalszych badań naukowych. Lektura całości rozprawy sprawia dość dobre wrażenie. Tak jak wcześniej wspominałem w analizie literatury brakuje aspektów eksploatacyjnych statków powietrznych, w tym obsług i napraw wykonywanych w warunkach polowych. Niepotrzebnie również, moim zdaniem, Doktorant w rozdziale 2., gdzie jest definiowana hipoteza, cele i zakres pracy, prezentuje streszczenie pracy.

Rozprawa jest zaprezentowana w sposób wystarczająco przejrzysty i logiczny, wzbogacona rysunkami i ilustracjami. Niedogodnością podczas czytania pracy jest częściowy brak odnośników do rysunków w tekście. Nie mam również uwag co do prowadzonego eksperymentu. Natomiast mam pewne uwagi do procesu wnioskowania. Nie rozumiem wykonywania oddzielnie: analizy wartości średniej arytmetycznej otrzymywanych wyników i analizy parametrów niepewności pomiarowej (odchylenie standardowe, przedziały ufności), które bezpośrednio związane są z wartością średnią. Moim zdaniem lepszym rozwiązaniem jest prezentowanie na wykresach kolumnowych jednocześnie wartości średniej dla cyklu badawczego i parametrów niepewności dla tego cyklu. Uprzejmie proszę Doktoranta, w ramach dyskusji publicznej, o komentarz w sprawie przyjętego rozwiązania. Chciałbym się również dowiedzieć o motywacjach Doktoranta w zakresie badania udarności – co skłoniło Doktoranta do wykonywania badań w zakresie tego parametru użytkowego materiału? Doktorant w pracy odnosi się również do norm dedykowanych metalom (str. 36) i na ich podstawie definiuje parametry wytrzymałościowe, natomiast w pracy bada tworzywa sztuczne. Jaki był powód przyjęcia takiego rozwiązania? Proszę również o informację, czy Doktorant wykonywał badania zmęczeniowe materiału, co sugeruje zapisem na str. 25 („...Dzięki przeprowadzonym badaniom zmęczeniowym, analizie...”, a których wyniki nie są prezentowane w pracy.

Przy lekturze pracy zauważyłem kilka pomyłek i niezręczności językowych, których analiza być może pomoże Doktorantowi w przygotowywaniu kolejnych pisemnych opracowań:

- str. 12 – „...*spalając kolejną warstwę materiału...*” powinno być: „*spajając kolejną warstwę materiału*”,
- str. 25 – „*Algorytm będzie starał się wyjść naprzeciw...*” str. 47 – „*Najniższą średnią odchylenia standardowego dopuszczalnej wytrzymałości na rozciąganie wykazały się próbki ...*”, str. 55 - „*Analiza otrzymanych wyników pokazała...*” – personifikacja wyrażen,
- str. 28, str. 44 – „*Wydrukowane materiały do badań posiadały...*” powinno być „*Wydrukowane materiały do badań miały...*”, „*W zaprezentowanym na wykresie zakresie, zakresie próbek wykazano, że największą wartość analizowanego współczynnika posiadają próbki...*” - powinno być „*W zaprezentowanym na wykresie zakresie, zakresie próbek wykazano, że największą wartość analizowanego współczynnika mają próbki...*”,

- str. 39 – „Siła wstępna ustawiona na maszynie równa była 0,2 MPa” – jednostką siły jest niuton, MPa jest jednostką naprężenia,
- w wytrzymałości materiałów nie ma pojęcia dopuszczalna wytrzymałość na rozciąganie – powinno być wytrzymałość doraźna (str. 40 podpis pod rys. 35, str. 55. Podpis pod rys. 55, itd),
- str. 40 – „Moduł Younga dla badanych próbek wynosił od około 30 do ponad 50 MPa”, „Wyniki badań wykazały różnice w dopuszczalnej wytrzymałości badanych próbek w zakresie od ponad 800 do ponad 1800 MPa” – Doktorant w opisach wyraźnie pomylił wytrzymałość doraźna z modułem Younga.
- str. 79 – „wprowadzania coraz większej ilości danych parametrycznych”, str. 103 „ilość zdjęć – 1000” – jeżeli dane parametryczne czy poszczególne zdjęcia traktować jako liczebnik policzalny powinno być „liczby” czy „liczba”.

4. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę zakres i dość dobry poziom recenzowanej pracy doktorskiej, jej bezpośredni związek z praktyką inżynierską oraz brak poważnych uwag merytorycznych stwierdzam, że w stopniu dostatecznym spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, Dziennik Ustaw nr 65, poz. 595. Wniosuję zatem o dopuszczenie pplka mgr inż. Tomasza Zahorskiego do publicznej obrony Jego rozprawy.



