

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych

ul. Ks. Bolesława 6

01-494 Warszawa

RECENZJA

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

Podstawa:

Recenzja została opracowana na podstawie zlecenia Koordynatora Dyscypliny Naukowej Inżynierii Mechanicznej Federacji Akademii Wojskowych dr hab. inż. Andrzeja Komorka, prof. Lotniczej Akademii Wojskowej- pismo z dnia 12 kwietnia 2022 r.

1. Ogólna i formalna charakterystyka pracy

Przedstawiona praca doktorska obejmuje interesujące zagadnienie wykorzystania technologii wydruku przestrzennego (określanego jako wydruk 3D) do zastosowań konstrukcyjnych lub naprawczych statków powietrznych. Wykorzystanie druku przestrzennego obejmuje coraz szersze gałęzie przemysłu, zastosowań medycznych oraz działań naukowo badawczych, umożliwiając szybkie prototypowanie oraz wykonywanie elementów o złożonym kształcie. Technologia wytwarzania addytywnego sięga lat osiemdziesiątych i określana jest mianem metody szybkiego prototypowania, dzięki możliwościom wprowadzenia modelu komputerowego finalnej geometrii obiektu do urządzenia końcowego. Taki sposób pozwala na szybkie wytwarzanie określonych geometrii za pomocą szeregu metod rozwijanych przez ostatnie kilka dekad. Do istotniejszych metod drukowania obiektów trójwymiarowych należą:

- Stereolitografia;
- Metoda selektywnego spiekania laserowego;
- Metoda spiekania warstwowego – określana jako FDM (ang. Fused Deposition Modelling).

Aplikacyjność metod druku 3D jest zależna od szeregu czynników związanych z rodzajem stosowanych materiałów, możliwościami technologicznymi kształtowania obiektu, wymaganiami związanymi z szybkością i jakością procesu (np. gotowy wydruk bez konieczności utwardzania), lub też kosztami związanymi z zastosowaniem określonych urządzeń. W przedstawionej pracy doktorant skupił się na metodzie FDM z uwagą na możliwość tworzenia modeli o zaawansowanym kształcie przy optymalnym koszcie stosowanych materiałów.

Metoda to wykorzystuje głównie takie materiały jak:

- Kopolimer akrylonitrylo – butadiene – styrenowy - ABS;
- Poliaktyd – PLA;
- Poliwęglany – PC.

W zależności od zastosowanego do druku materiału, występuje szereg wymagań związanych z parametrami procesu lub też koniecznością dodatkowego podgrzewania. Metoda umożliwia

projektowanie procesu przeprowadzenia wydruku w celu kształtowania własności wytrzymałościowych wytwarzanego elementu oraz kształtowaniem jego masy poprzez sterowanie procesem wypełnienia. Wytwarzanie takich struktur w zależności od wybranej metody jest związane z procesem kryterialnego sterowania parametrami procesu w celu uzyskania produktu o pożądanych własnościach.

Autor podjął się realizacji interesującego i perspektywicznego zagadnienia związanego z wykorzystaniem technologii druku przestrzennego do wytwarzania konstrukcji lotniczych lub zestawów naprawczych. Głównym celem rozprawy było określenie parametrów niezbędnych do wytwarzania optymalnych konstrukcji w technologii druku 3D do zastosowania w konstrukcjach lotniczych.

Praca przedstawiona przez autora zwiera 129 stron maszynopisu i poza wykazem cytowanej literatury i witryn internetowych **zawierającej 45 pozycji** oraz spisem rysunków i tabel zawiera:

- **Wprowadzenie** w którym doktorant przedstawia historię rozwoju technologii druku przestrzennego, charakteryzuje i opisuje wybrane technologie. Przedstawione opisy pozwalają na określenie jakościowej oceny wybranych metod wytwarzania przyrostowego w oparciu o zasadę działania urządzenia drukującego. Ponadto obejmują metodologię procesu oraz kompozycję końcową produktu związaną z potencjalnym zastosowaniem obróbki finalnej lub procesów termicznych. Opisy te przybliżają również wpływ parametrów wydruku na określone własności produktowe, takie jak masa i wytrzymałość. Wprowadzenie kończy opisowe przedstawienie podstawowych zastosowań przyrostowych technologii produkcji, które mają zastosowanie w produkcji elementów dla zastosowań przemysłowych, medycznych lub obronnych.

- **Rozdział drugi** przedstawiający cel, tezę i zakres realizowanej pracy. Zakresem pracy jest określenie parametrów procesu wytwarzania przyrostowego dla określonej i wybranej techniki jaką jest FDM. Praca jest realizowane poprzez postawione cele szczegółowe obejmujące:

- przygotowanie próbek w kryterialnie określonym procesie wytwarzania;
- wykonanie badań mechanicznych przygotowanych próbek w celu określenia wpływu wybranej technologii na własności wytrzymałościowe;
- opracowanie metodologii wyboru tych parametrów wspartej przez opracowany algorytm postępowania.

Przedstawiony zakres pracy został podzielony na dwie części obejmujące badania mechaniczne i materiałowe przygotowanych próbek oraz określenie kroków postępowania, sformułowane w sposób algorytmiczny do określenia metodologii wyboru parametrów i materiałów do wytwarzania przyrostowego.

- **Rozdział trzeci** w którym doktorant przedstawia proces przygotowania próbek badawczych, proces wykonywania badań wytrzymałościowych oraz ocenę strukturalną z wykorzystaniem tomografii komputerowej. Autor do realizacji pracy przygotował zestawy próbek badawczych zgodnie z wymogami normy EN – ISO 527-1 oraz ISO 179-1. Metodologia przygotowania próbek objęła:

- wybór materiału;
- gradientowe wykonanie wypełnienia próbek z wypełnieniem liniowym i heksagonalnym;
- orientację ułożenia próbek w komorze drukarki;

Dla serii przygotowanych próbek doktorant przeprowadził badania wytrzymałościowe. Badania wytrzymałościowe objęły:

- rozciąganie dla próbek o różnym stopniu wypełnienia;
- rozciąganie dla próbek o różnym kierunku ustawienia w komorze wydruku oraz różnym wypełnieniu i stopniu wypełnienia;
- rozciąganie dla różnych rodzajów pochodzenia filamentu;
- rozciąganie dla różnych materiałów i technologii wydruku;

- rozciąganie dla zmiennej temperatury wydruku w zależności od stopnia wypełnienia;
- badanie udarności dla próbek o różnym stopniu wypełnienia;
- badanie udarności dla różnych rodzajów pochodzenia filamentu;
- badanie udarności dla próbek o różnym kierunku ustawienia w komorze wydruku oraz różnym stopniu wypełnienia;
- badanie udarności w zależności od stopnia nasączenia zewnętrznej powłoki żywicą;
- badanie udarności w zależności od technologii wydruku i rodzaju materiału.

W dalszej części rozdziału autor dokonuje oceny makrostrukturalnej wykonanych próbek z wykorzystaniem metody tomografii komputerowej. Ocena ma na celu kwantyfikację rozkładu uszkodzeń w szczególności o charakterze porowatości. Tego typu uszkodzenia mają istotny wpływ na zmniejszenie wytrzymałości wykonanej konstrukcji.

- **Rozdział czwarty** – rozdział czwarty przedstawia sposób podejścia autora do opisu bazy danych dotyczących wszystkich istotnych parametrów wytwarzania określonego elementu włącznie z jego identyfikacją. Rozdział został napisany w formie szczegółowej instrukcji opisującej funkcjonalności poszczególnych formularzy i pól edycyjnych. Rozdział zawiera również opracowany algorytm postępowania precyzujący kryteria doboru materiału i technologii wydruku.

- **Rozdział piąty** – rozdział przedstawia fenomenologiczny opis technologii przygotowania i wydruku elementu stanowiącego narzędzie obsługowe. Przygotowany element zostały wytworzony z proszków kobalt-chrom i stali 316 L. Wytworzony na podstawie inżynierii odwrotnej element został zweryfikowany i porównany pod kątem jakości struktury z wykorzystaniem metody tomografii komputerowej.

- **Rozdział szósty** w którym autor przedstawia syntetyczne podsumowanie przeprowadzonych badań formułując je w postaci wniosków.

2. Ocena tematu, celu i zakresu pracy

Autor przedstawia cele, tezę i zakres swojej rozprawy w rozdziale drugim. Głównym celem rozprawy przedstawionym przez doktoranta jest **opracowanie metody wykorzystanie materiałów i technologii wydruku przestrzennego w procesie tworzenia i naprawy sprzętu lotniczego**.

Autor wskazuje ponadto cele szczegółowe którymi są:

- wykonanie badań wytrzymałościowych dla serii przygotowanych próbek w wydruku 3D w różnych konfiguracjach wykonawczych;
- opracowanie algorytmu postępowania związanego z wyborem parametrów wydruku na podstawie przygotowanej bazy danych;
- wykonanie i analiza wydruku części elementów służących do obsługi sprzętu lotniczego.

Zakres przedstawionej przez doktoranta pracy obejmuje interesujący z punktu widzenia sektora lotniczego obszar technologiczny t.j. szybkiego wytwarzania konstrukcji i elementów lotniczych z możliwością prototypowania. Autor postawił zadanie związane z próbą oceny optymalnego wyboru zarówno metody wytwarzania jak i wpływu szeregu parametrów zarówno materiałowych jak i wykonawczych na własności wytrzymałościowe badanego elementu. Próbkę poddawane były testom mechanicznym (rozciąganie i udarność) oraz częściowo korelowane za pomocą metody nieniszczącego charakteryzowania struktury za pomocą tomografii komputerowej. Autor na podstawie przeprowadzonych badań formułuje również potrzebę wykorzystania uzyskanych danych w oparciu o przygotowaną bazę danych stanowiącą źródło wiedzy dla możliwego wielokryterialnego wyboru parametrów wykonawczych dla technologii druku 3D. Na podstawie istniejącego oprogramowania autor wykonuje szereg działań inżynierskich związanych z określeniem danych oraz kategoryzowaniem encji

dla typów określonych danych. Autor proponuje ponadto algorytmizację podejścia do kryterialnego wyboru parametrów wydruku w oparciu o szereg danych pozyskanych na drodze badawczej. Działania takie są sensowne z uwagi na możliwość weryfikacji zebranych danych w trakcie eksploatacji jak również potencjalnych możliwości związanych z budową modeli predykcyjnych do oceny własności uzyskanego wyrobu.

Na tej podstawie uważam, iż podjęcie zaproponowanej tematyki jest celowe a przeprowadzone badania stanowią znaczący wstęp do dalszych badań związanych z wykorzystaniem tej technologii w zastosowaniach lotniczych.

3. Ocena rozprawy

Przygotowana i przedstawiona praca zawiera wkład w potencjalny obszar związany z wykorzystaniem technologii wytwarzania przyrostowego w zastosowaniach w konstrukcjach lotniczych. Przedstawione przez autora wyniki zawierają elementy procesu badawczego i podejścia analitycznego. Element ten jest związany z procesem wykonywania badań mechanicznych konstrukcji wytworzonych metodą przyrostową. Uzyskane wyniki analizowane są za pomocą uproszczonych miar statystycznych i umożliwiają jakościowe i wielokryterialne porównanie uzyskanych podczas badania struktur. Niestety praca nie jest pozbawiona wad które wpływają na jej ocenę. Jednym z elementów jest brak odniesienia się w uzyskanych badaniach do rzeczywistych własności struktury. Autor w swojej pracy dokonuje tak jak określa rozszerzenia badań materiałowych o weryfikację nieniszczącą przygotowanych próbek za pomocą tomografii komputerowej. Autor komentując na stronie 72 wyniki, określa wartości ilościowe wad w postaci porów bez oceny kryteriów akceptowalności. Pojawia się naturalne pytanie w jaki sposób wytwarzanie wpływa zarówno na zakres ilościowy i jakościowy powstałych uszkodzeń a finalnie na uzyskaną wytrzymałość badanego elementu. Zawarte w pracy wyniki badań przedstawiono na wykresach słupkowych. Autor prezentuje zarówno wartości średnie (Rys. 35 – Rys. 41) jak i wartości odchylenia standardowego na oddzielnych wykresach (Rys.42 – Rys.44). Do przedstawienia zależności statystycznych możliwe jest wykorzystanie analiz wykorzystujących wykresy pudełkowe na których możliwa jest analiza trendu wraz z oceną wartości rozrzutu. Określanie tych wartości w sposób rozdzielny utrudnia interpretację i prowadzi do nieściśłości w opisie i ocenie wyników (np. str. 46 – pojawia się zapis „wartość średnia odchylenia standardowego”) utrudniając komparatywną ocenę wyników rozrzutu. Kolejnym elementem nie do końca zrozumiałym jest podejście związane z wyznaczeniem przedziałów ufności dla badanych próbek. W opisie brak jest liczności zbioru dla którego szacowano te wartości. Pojawia się pytanie o sens zapisu wartości liczbowych dla modułu Younga (Rys. 45) z dwumiejscową precyzją po przecinku podczas gdy analizowane przedziały wartości są o kilka rzędów większe. Do takiej analizy najbardziej odpowiednia wydaje się analiza wariancji Annowa – pozwalając nie tylko ustalić zależności związane z rozrzutami dla poszczególnej grupy danych ale jednocześnie określić różnice między poszczególnymi grupami.

Znaczna ilość przedstawionych wykresów na których znajdują się nie skorelowane wartości trendów bez finalnej i komparatywnej oceny w postaci podsumowania wyników utrudnia czytanie i ocenę wyników. W niektórych przypadkach dane przedstawione w postaci histogramu (Rys. 74) są nieczytelne i mogłyby zostać przedstawione w postaci skalowanej z oceną wartości.

W kilku miejscach rozdziału opisującego uzyskane wyniki autor pozostawia nie skomentowane obserwacje – np.:

- Str.57 – „zaobserwowano, że wraz ze wzrostem procentowego udziału materiału przy niższych temperaturach wydruku zwiększa się wartość modułu Younga, a spada ze wzrostem temperatury ekstrudera”;
- Str.59 – „Stwierdzono również, że przy różnicach w procentowym wypełnieniu materiałem następuje zmiana własności w funkcji temperatury ekstrudera”.

które wymagają analizy przyczyn takich zmian lub opisu jakościowego związanego np. z oceną mikrostruktury.

Rozdział 4 w większości stanowi formalną instrukcję oprogramowania zastosowanego do badania i mógłby zostać napisany jako załącznik do pracy.

W rozdziale 4 na stronie 95 jako element opisowy realizacji formalizmu algorytmu pojawia się stwierdzenie: „W wyniku przeprowadzenia np. kilku prób siłowych lub próbnych lotów testowych można by w warunkach polowych ocenić, czy dany rodzaj materiału spełnia oczekiwania”. Przyjęcie takich założeń jest niezgodne z obowiązującą technologią realizacji napraw na statkach powietrznych, gdzie stosowanie nowych materiałów lub konstrukcji zamiennych wymaga szeregu sformalizowanych testów związanych z lotami badawczymi próbnymi.

Praca nie jest również wolna od błędów edycyjnych czy stylistycznych z których wymienię kilka przykładowych:

- str. 35 – słowo nadań zamiast badań (wiersz 8);
- str. 37 – w zależności opisującej wskaźnik p – powinna się znaleźć wartość pierwotnej średnicy próbki do;
- str. 41 – pojawia się zdanie o charakterze wtrąconym bez zależności z poprzedzającym tekstem (Wypełnienie próbek typu heksagonalnego) – wiersz 8 od dołu;
- str. 43 – wzór opisujący moduł Younga występuje bez wyjaśnień oznaczeń oraz bez jednostek;
- Rys.63 i Rys.64 nie precyzują rodzaju zarejestrowanych wartości (wartość średnia czy wartość maksymalna);
- Szereg błędów stylu związanych z powielaniem opisów np. Rys.52 i 55 – „Dopuszczalna wytrzymałości...)
- W przedstawionych badaniach na niektórych wykresach pominięte są nie tylko opisy poszczególnych rodzajów osi ale również zakresy wartości dla rejestrowanych danych (np. Rys. 66 i Rys.67).

Do podstawowych zalet rozprawy pod względem opisu przedstawionego problemu, wyboru metod i zakresu badań oraz sposobu jego rozwiązania zaliczam:

- a) podjętą tematykę rozprawy oraz szeroki zakres przedstawionych w pracy badań eksperymentalnych świadcząca o umiejętnościach realizacji procesu badawczego przez doktoranta;
- b) przeprowadzenie szeregu badań wytrzymałościowych wraz z próbą korelacji wyników z metodą nieniszczącą;
- c) próbę przeprowadzenia procesu dowodowego dla elementu komparatywnego wytworzonego metodą druku przestrzennego;
- d) próbę usystematyzowania podejścia do wykonywania napraw lub inżynierii odwrotnej dla elementów konstrukcji lotniczych z wykorzystaniem metod addytywnego wytwarzania.

Niestety praca nie jest wolna od wad, które nie dyskwalifikują pracy ale powinny zachęcić doktoranta do szerszej dyskusji i dalszego pogłębiania wiedzy w przedstawionym i ciekawym temacie a do których zaliczam:

- a) brak szczegółowej i głębszej dyskusji przedstawionych wyników obrazujących wykonane badania, w szczególności analizy trendów zarejestrowanych danych i odniesienia się do wartości rozrzutów zarejestrowanych danych;
- b) niepoprawne przedstawienie graficznych wyników na rysunkach obrazujących zmiany parametrów obiektu w funkcji parametrów wytwarzania. Być może bardziej systematyzujące i pozwalające na głębsze wnioskowanie byłoby wykorzystanie metod analizy wariancji lub metod grupujących i separujących zarejestrowane dane bez konieczności uśredniania wyników;
- c) brak korelacji uzyskanych wyników z możliwością oceny makrostruktury np. z wykorzystaniem metody tomografii komputerowej. Brak tej korelacji uwidacznia się w braku dyskusji oceniającej uzyskane wyniki oraz pojawiającymi się komentarzami określającymi np. konieczność wykonania dalszej obróbki termicznej lub ciśnieniowej po wykonaniu wydruku;
- d) Słabo przeprowadzoną analizę stanu wiedzy w zakresie prowadzonych badań. W wykazie cytowań zawarto 45 pozycji z czego znaczna część to odnośniki do stron internetowych stanowiących informacje handlowe lub techniczne, a część publikacji to periodyki lub książki o charakterze popularyzującym technologię. Wpływ tak przeprowadzonej analizy stanu wiedzy wpływa na brak możliwości szczegółowej analizy wyników przeprowadzonych badań.

Ponadto oczekuję od autora rozprawy odpowiedzi na poniższe spostrzeżenia:

1. Proszę o określenie celowości oceny przedziałów ufności dla zarejestrowanych danych i podanie liczności grupy dla której wykonano badanie;
2. W jaki sposób można sterować jakością wytwarzanych struktur w celu zmniejszenia ilości powstających uszkodzeń w postaci porów;
3. Czy istnieją w zastosowaniach przemysłowych metody kontroli jakości takich struktur i wymagania zapewniające zmniejszenie ilości powstających uszkodzeń oraz wymagania normujące ilość i wielkość uszkodzeń;
4. Czy należy po wytwarzaniu takich struktur prowadzić dodatkowe czynności procesowe i takie jak: wygrzewanie w piecu, lub obróbka termiczna z udziałem ciśnienia. Jeśli tak to w jakich przypadkach.

4. Wniosek końcowy

Praca doktorska przedstawiona przez mgr inż. Tomasza Zahorskiego, jej zawartość i forma i poziom przedstawionej pracy **spełnia wymagania stawiane** rozprawom doktorskim w rozumieniu **art. 13 pkt 7 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r., poz 1789) w związku z Art. 179, ust.1, Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r., „Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym” (Dz.U. z 2018 r., poz 1669)**. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Tomasza Zahorskiego do publicznej obrony jego rozprawy.

