

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska
al. Powstańców Warszawy 8
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 07.09.2018 roku

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Koziora
pt. „ANALIZA WPŁYWU PARAMETRÓW PROCESÓW
TECHNOLOGICZNYCH WYBRANYCH TECHNOLOGII PRZYROSTOWYCH
NA GEOMETRIĘ
I WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE WYROBÓW”

Podstawa opracowania: umowa z dnia 12.07.2018 r. z Politechniką Świętokrzyską w Kielcach reprezentowaną przez Dziekana Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn prof. dr. hab. inż. Tomasza L. Stańczyka, dotycząca opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Koziora.

1. Wprowadzenie

Metody szybkiego prototypowania wkraczają w coraz więcej obszarów nauki i procesów produkcyjnych przechodząc w fazę szerokiej aplikacji w wielu gałęziach przemysłu, szczególnie lotniczego, samochodowego, elektromaszynowego czy przetwórczego. W przypadku przyrostowych metod wytwarzania można zauważyć brak szczegółowych informacji dotyczących właściwości mechanicznych prototypów budowanych warstwowo.

Badania dotyczące właściwości próbek i prototypów wytwarzanych przyrostowo są uzasadnione potrzebą aplikacji przemysłowej tzw. druku 3D oraz z punktu widzenia prac normalizacyjnych dotyczących tego typu technologii. W ostatnim czasie trwają intensywne prace nad normalizacją zagadnień związanych z procesami przyrostowymi w ramach zespołów roboczych ISO oraz Polskiego Komitetu Normalizacyjnego *Sekcji PKNKT207 Obróbki Ubytkowej i Przyrostowej oraz Charakterystyki Warstwy Wierzchniej*.

Biorąc to pod uwagę tematyka pracy jest aktualna a jej podjęcie uzasadnione. Wyniki badań zawartych w dysertacji mogą być aplikowane w różnych gałęziach przemysłu do

produkcji elementów stosowanych w budowie maszyn oraz wielu innych obszarach, w tym medycynie czy projektowaniu artystycznym i wzornictwie przemysłowym.

2. Struktura pracy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr. inż. Tomasza KOZIORA pt. „*Analiza wpływu parametrów procesów technologicznych wybranych technologii przyrostowych na geometrię i właściwości mechaniczne wyrobów*” przedstawia w sposób teoretyczny i doświadczalny zagadnienia związane z badaniem wybranych parametrów próbek wytwarzanych z zastosowaniem wybranych technologii addytywnych.

Praca została wydana drukiem na Politechnice Świętokrzyskiej i składa się ze 195 stron zawartych w dziewięciu rozdziałach. Bibliografia obejmuje 88 pozycji ze źródeł krajowych i zagranicznych, 12 norm, 7 patentów, jednego zgłoszenia patentowego oraz 7 stron internetowych. Zachowane zostały prawidłowe proporcje pomiędzy opracowaniami o charakterze naukowym a pozostałymi pozycjami zawartymi w literaturze. Zamieszczone normy dotyczą zagadnień o charakterze ogólnym związanym z badaniami tworzyw sztucznych oraz specyfikacją geometryczną wyrobów. Brak jest w tym zestawieniu norm dotyczących addytywnych procesów wytwarzania, a których liczba systematycznie się zwiększa.

Praca rozpoczyna się od obszernego wprowadzenia (rozdział 1), w którym opisane są podstawowe informacje związane z technologiami przyrostowymi, ich podział oraz podstawowe procesy wykorzystywane w technologiach addytywnych w tym obróbkę danych numerycznych i wybrane sposoby aplikacji.

Rozdział drugi stanowi opis aktualnego stanu wiedzy opracowany na podstawie literatury oraz badań wstępnych przeprowadzonych przez doktoranta w oparciu o specjalnie przygotowane próbki testowe wytworzone metodami FDM (Fused Deposition Modeling), PJM (Poly Jet Modeling) oraz i szczególnie SLS (Selective Laser Sintering). Informacje te stały się podstawą do określenia celu sformułowanego jako: opracowanie eksperymentalnych modeli matematycznych opisujących wpływ parametrów procesów technologicznych wybranych technologii przyrostowych na dokładność wymiarową oraz właściwości mechaniczne wytwarzanych elementów, a szczególnie elementów technicznych. Określono również zakres badań sprecyzowany w sześciu punktach.

W rozdziale czwartym przedstawiono program badań obejmujący określenie wpływu parametrów technologicznych na dokładność wykonania oraz wybrane właściwości mechaniczne i użytkowe próbek badawczych. Wytypowano szereg parametrów wejściowych i wyjściowych dla obiektów badawczych wytworzonych określoną technologią przyrostową. Do parametrów wejściowych włączono ogólnie dla procesów przyrostowych usytuowanie modelu względem układu współrzędnych maszyny przyrostowej (kierunek usytuowania), grubość warstwy oraz szczególnie dla technologii SLS moc lasera, liczbę skanowań lasera, prędkość lasera, gęstość energii lasera. Parametry te zostały zebrane w tabelach dla technologii SLS i PJM bez ich

tabelarycznego określania dla technologii FDM. Można zauważyć, że technologia FDM została przez Autora pracy przebadana nie tak szczegółowo jak technologia SLS. Należy tu wspomnieć, że dla procesów opartych o technologię FDM można wyróżnić wiele parametrów sterowalnych podczas wytwarzania prototypu, które mają wpływ na dokładność modeli i właściwości mechaniczne. Można tu wyróżnić grubość warstwy, strukturę nakładania warstw czy strukturę wewnętrzną w układzie trójwymiarowym. Jednak Doktorant nie podjął się uszczegółowienia badań w obrębie technologii FDM.

Rozdział piąty przedstawia technologie wykorzystane do badań w ujęciu bardziej szczegółowym z opisem urządzeń (drukarek 3D: Connex 350 - PJM, Formiga P100 - SLS, Dimention 1200es - FDM) stosowanych do wytworzenia próbek badawczych. Urządzenia te znajdują się na wyposażeniu Laboratorium Niekonwencjonalnych Technologii Wytwarzania Katedry Technologii Mechanicznej i Metrologii w Politechnice Świętokrzyskiej. Z punktu widzenia struktury pracy być może celowe byłoby połączenie rozdziałów czwartego i piątego, lecz jest to tylko uwaga porządkowa.

Kolejne dwa rozdziały dotyczą realizacji badań laboratoryjnych oraz analizy wyników. W rozdziale szóstym przedstawiony jest materiał dotyczący analizy wymiarowo - kształtowej próbek, a w rozdziale siódmym badań własności mechanicznych. Przedstawiony materiał zawiera bardzo wiele informacji z przeprowadzonych badań przedstawionych w sposób generalnie czytelny na wykresach, w tabelach i wizualizacjach.

Rozdział ósmy opisuje przykład możliwości aplikacji technologii przyrostowych do wykonania elementów uszczelniających stosowanych w budowie maszyn. Przeprowadzono analizę wyników badań mieszków sprężystych wytworzonych z zastosowaniem selektywnego spiekania proszku poliamidu. Do badań zastosowano maszynę wytrzymałościową Inspekt Mini 3kN oraz autorski przyrząd zaprojektowany w ramach realizacji pracy doktorskiej, zgłoszony do ochrony patentowej.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono podsumowanie i wnioski sformułowane na podstawie wykonanych w pracy doktorskiej badań i analiz. Dodatkowo sformułowane zostały kierunki dalszych badań.

3. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Zagadnienia przedstawione w dysertacji dotyczące wybranych technologii przyrostowych odnoszą się do ważnych i aktualnych zagadnień nie tylko z punktu widzenia naukowego ale również aplikacyjnego. Badania i analiza wpływu parametrów procesów technologicznych technologii przyrostowych na geometrię i właściwości mechaniczne wyrobów jest istotna z punktu widzenia naukowego ale przede wszystkim z punktu widzenia aplikacji przemysłowych tzw. druku 3D. Mimo, że istnieje wiele publikacji przedstawiających wyniki badań właściwości mechanicznych oraz dokładności geometrycznej próbek normatywnych wytwarzanych przyrostowo, jednak niewiele jest opracowań przedstawiających wyniki badań tribologicznych.

Analizie wymiarowo – kształtowej poddano próbki o kształcie cylindrycznym czyli wałek i tuleję z założoną wartością tolerancji. Z punktu widzenia budowy maszyn takie podejście z założenia jest słuszne, jednak Autor nie opisuje na wstępie do czego te założenia się odnoszą, można wywnioskować i odczytać później, że do modelu nominalnego wykonanego w programie 3D-CAD. Normatywne założone luzy dla tych wartości wynoszą $73\mu\text{m}$ oraz $53\mu\text{m}$ co jak wiadomo w procesie modelowania 3D nie jest problemem, ponieważ dokładność wykonywania modeli numerycznych większości programów jest na poziomie $0,001\text{mm}$. Wykonanie próbek przedstawionymi w pracy metodami przyrostowymi (SLS, PJM i FDM) leży jednak poza założoną tolerancją, co w pracy zostało potwierdzone. Próbki o kształcie walcowym wykonane zostały w dwóch położeniach względem układu współrzędnych maszyn przyrostowych, parametr ten określił Autor pracy jako Pd – kierunek usytuowania modeli podczas wytwarzania i założył wartości głównie: $Pd=90^\circ$ oraz $Pd=0^\circ$ oraz w niektórych przypadkach $Pd=45^\circ$. Doktorant potwierdził w wyniku badań, że parametr Pd istotnie wpływa na dokładność geometryczną prototypów na podstawie badań próbek o kształcie walcowym. Analizie poddano również strukturę geometryczną powierzchni próbek w układzie trójwymiarowym oraz strukturę próbek wykonanych metodą SLS z zastosowaniem elektronowego mikroskopu skaningowego.

Rozdział ten przedstawia wiele wyników badań, jednak można odnieść wrażenie, że nie są one uporządkowane w sposób umożliwiający porównanie wyników dla trzech przedstawionych przez Autora technologii SLS, PJM i FDM. Właściwie w rozdziale tym nie ma wyników badań dokładności geometrycznej próbek wykonanych metodą FDM, a w zakresie badań (rozdział III, pkt. 4 – str. 52) Doktorant napisał, że będzie takie badania wykonywał. Informacje dotyczące dokładności geometrycznej próbek wykonanych metodą FDM zawarte są bardzo skrótowo w rozdziale drugim. Tabela 6.10 przedstawia jedynie zestawienie porównawcze technologii SLS i PJM w odniesieniu do kasy dokładności wykonania próbek badawczych. Występują w tym rozdziale takie same oznaczenia wielkości geometrycznych np. $D1=24\text{mm}$ dla średnicy sworznia (rys. 6.12) oraz $D1=5\text{mm}$ dla głębokości rowka (rys. 6.20), co utrudnia interpretację wyników. Dodatkowa uwaga, rysunek 6.12 wykonany jest zgodnie ze sztuką dokumentacji rysunkowej, natomiast rysunek 6.20 można uznać jedynie za poglądowy. Analiza wyników badań struktury geometrycznej powierzchni (SGP) i obrazów SEM wykonana została jedynie dla próbek wykonanych metodą SLS.

Autor zaprojektował modele badawcze z zastosowaniem programu Solid Edge ST7 i napisał, że przyjął wybrane wartości luzów dla modeli 3D-CAD. W przypadku rozważań dotyczących dokładności geometrycznej, Doktorant nie opisuje czy brał pod uwagę w swojej analizie wpływ lub brak wpływu obróbki danych na dokładność geometryczną próbek przedstawionych w rozdziale szóstym. Rozważanie te mogą być istotne, ponieważ w przypadku obróbki danych z zastosowaniem formatu STL dokładność modelu 3D-STL, na podstawie którego wykonywany jest prototyp jest zależna od przyjętych w procesie triangulacji współczynników tolerancji. Doktorant w rozdziale pierwszym (podrozdział 1.3 i 1.4) odnosi się do tej kwestii analizując modele koła zębatego i wspornika, które nie mają kontynuacji w dalszych częściach rozprawy.

Przedstawiona w rozdziale siódmym analiza właściwości mechanicznych odnosi się do próbek wykonanych trzema metodami przyrostowymi SLS, PJM oraz FDM, stanowi ciekawy i oryginalny materiał, szczególnie w zakresie badań tribologicznych. Niestety, również w tym przypadku badania zostały przeprowadzone w sposób uniemożliwiający pełną analizę porównawczą parametrów technologicznych przedstawionych procesów przyrostowych na właściwości mechaniczne próbek. Z tego względu wnioski ze zrealizowanych badań mają albo charakter bardzo ogólny, albo szczegółowy dla danej technologii ze szczególnym uwzględnieniem technologii SLS.

Z punktu widzenia aplikacyjnego badań, istotna jest analiza zastosowania przyrostowych metod wytwarzania do produkcji gotowych części maszyn, w przypadku przedmiotowego opracowania elementów uszczelnień. Przedstawione w rozdziale ósmym wyniki badań mogą stanowić pewnego rodzaju wytyczne dla konstruktorów zajmujących się projektowaniem mieszków sprężystych planowanych do wytworzenia w procesie przyrostowym. Analiza wyników badań w kontekście parametrów technologicznych wytwarzania addytywnego stanowi oryginalny wkład Doktoranta w dyscyplinę *budowa i eksploatacja maszyn*.

Przedstawione w rozdziale dziewiątym podsumowanie i końcowe wnioski odnoszą się do założonego celu oraz programu badań i mają charakter dość ogólny. Biorąc jednak pod uwagę, że rozdziały poprzednie zakończone są wnioskami o charakterze szczegółowym należy to uznać za prawidłowe podejście do kwestii podsumowania rozprawy.

Praca w znacznej mierze oparta jest na badaniach, zrealizowanych w oparciu o założony program z wykorzystaniem nowoczesnej i odpowiednio dobranej aparatury.

Przedstawione uwagi w dużej mierze można uznać, że mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na wartość merytoryczną rozprawy. Metodyka badań oraz opracowane modele badawcze stanowią w znacznej części oryginalny wkład Autora w rozwój dyscypliny *budowa i eksploatacja maszyn*. Stwierdzam jednocześnie, że wysoko oceniam poziom merytoryczny rozprawy ze względu na dużą liczbę przeprowadzonych badań oraz wykonanych na ich podstawie analiz.

4. Podsumowanie

Na podstawie analizy przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że:

- rozprawa dotyczy analizy wybranych obszarów technologii przyrostowych, odnosi się do aktualnej wiedzy i praktyki objętej jej zakresem, a w wielu elementach wnosi nowe treści,
- wybór tematyki pracy został dokonany w sposób trafny, a zakres pracy spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim,

- struktura i formalny układ pracy jest prawidłowy,
- zasadnicze cele pracy zostały osiągnięte w zakresie przyjętym przez Autora,
- założenia przyjęte w pracy i opracowane własne procedury badawcze mogą być przedmiotem dalszych prac badawczych.

W dysertacji Autor zrealizował bardzo trudne zadania badawcze, które nie wyczerpują całości zagadnień związanych z badaniem elementów maszyn wytwarzanych przyrostowo, można zauważyć, że jest to pewien etap badań prototypów wytwarzanych w oparciu o tzw. druk 3D w kontekście zastosowań przemysłowych.

Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej *budowa i eksploatacja maszyn*, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

Stwierdzam zatem, że praca mgr. inż. Tomasza Koziora pt.: *„Analiza wpływu parametrów procesów technologicznych wybranych technologii przyrostowych na geometrię i właściwości mechaniczne wyrobów”* (promotor: prof. dr hab. inż. Czesław Kundera) spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określonych w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz.U z 2017, poz. 1789 t.j. ze zm.), a Autor może być dopuszczony do jej publicznej obrony.

Grzegorz Ziobnik