

*Prof.dr hab. inż. Edward CHLEBUS, prof. zw.
Wydział Mechaniczny
Politechniki Wrocławskiej
50-371 Wrocław
ul. Łukasiewicza 5*

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. **Ireneusza CENY** zatytułowanej: **„Dokładność odwzorowania modeli wirtualnych w wybranych metodach rapid technologii”** wykonanej na zlecenie Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej

1. Wstęp.

Do najwyżej cenionych dziś cech systemów produkcyjnych zalicza się m.in. ich elastyczność, szybkie reagowanie na zmiany konstrukcyjne i technologiczne, krótki cykl rozwoju i wdrażania produktu do produkcji, wysoka jakość i niskie koszty produkcji. Tym wymaganiom mogą sprostać najnowsze technologie i techniki wytwarzania oparte na numerycznym zapisie cech geometrycznych i materiałowych oraz ich sprzężenie z funkcjonalnymi cechami maszyn wytwórczych oraz oczekiwanych funkcji i stosowanych technologii.

W ostatnich latach nastąpił dynamiczny rozwój nowych technologii, tzw. przyrostowych, nazywanych też addytywnymi lub rapid prototyping, które pozwalają na agregację wyżej wymienionych czynników w jednym procesie technologicznym i umożliwiają też na wytwarzanie obiektów o dowolnej praktycznie geometrii, bardzo przyjaznym środowisku sterowanie parametrami procesu i zastosowaniem różnych materiałów, w tym struktur wielomaterialnych.

W tym łańcuchu przetwarzania danych opisujących przyrostowe procesy wytwarzania, pojawiają się ważne z naukowego i praktycznego punktu widzenia, grupy zagadnień:

- opracowanie nowych materiałów i ich fizycznej formy (ciecz, proszek, drut...) przydatnych w technologiach przyrostowych,
- opracowanie metod opisu geometrii modeli wirtualnych powierzchni wyjściowych i modeli rzeczywistych wytworzonych przedmiotów,
- opracowanie algorytmów generowania procesów obróbkowych i strategii skanowania dla wybranych klas przedmiotów obrabianych,
- opracowania metod i narzędzi wspomagania decyzji projektowych w procesach przyrostowego wytwarzania bezpośredniego lub pośredniego (rapid tooling),

- aplikacji metod i narzędzi w określonym otoczeniu systemów wytwórczych stosujących technologie przyrostowe bezpośrednie i pośrednie.

Doktorant postanowił zbadać dokładność odwzorowania modeli wirtualnych odnoszoną do modeli fizycznych wytworzonych wybranymi technologiami przyrostowymi przedstawiając pracę zatytułowaną „**Dokładność odwzorowania modeli wirtualnych w wybranych metodach rapid technologii**”.

Promotorem pracy jest dr hab.inż. Andrzej KAWALEC prof. PRz.

2. Struktura, cel i zakres pracy

Przedłożona do recenzji praca jest bardzo obszerna, liczy 254 stron, składa się z 10 rozdziałów, 237 pozycji literaturowych, 5-ciu załączników (liczących w sumie 96 stron, spisów tabel i rysunków) oraz streszczenia w języku polskim i angielskim

Zagadnienia i tematyka badawcza poruszana w pracy jest aktualna i istotna nie tylko z naukowego ale i praktycznego punktu widzenia. Technologie generatywne rozwijają się w szybkim tempie i wiążą w sobie wiele problemów badawczych związanych z materiałem, procesem, ekonomią, środowiskiem i zapotrzebowaniem rynkowym. Autor pracy testował wiele technologii generatywnych, a mianowicie FDM, PolyJet oraz SLS 3DSystem.

Autor pracy zdefiniował główny jej cel, w formie dwóch zadań:

1. Ocena wpływu wybranych czynników geometrycznych, materiałowych, technologicznych i ekonomicznych na dokładność odwzorowania kształtu, wymiarów, jakości powierzchni i struktury wewnętrznej prototypów lub modeli wykonanych rapid technologiami: SLS, FDM, PolyJet,
2. Określenie kryteriów technicznych z uwzględnieniem aspektów ekonomicznych wyboru racjonalnej metody rapid technologii (SLA, FDM, PolyJet) do wykonania prototypów lub modeli na przykładzie elementów wykorzystywanych w przemyśle samochodowym.

Powyższe cele Autor podzielił na 11 zadań badawczych szczegółowych.

Pełną zawartość pracy Autor zawarł w 10-ciu rozdziałach, które zawierają główne cele badawcze i zastosowane techniki:

Rozdz.1. Wprowadzenie – ogólne ustosunkowanie się do tematu pracy,

Rozdz.2. Analiza literatury – zawiera zwięzłą analizę stanu zagadnienia, podano i uzasadniono przyczyny wyboru tematu,

Rozdz.3. Cel, hipoteza i zakres pracy – opisano cele i zakres pracy,

Rozdz.4. Program badań, opracowane modele o metodyka badań - bardzo szeroko omówiono modele testowe, metodykę pomiarów i stosowaną aparaturę badawczą (rozdział liczy 45 stron i jest zdecydowanie za długi),

Rozdz.5. Badania modeli podstawowych GMT i cienkościennych GMTC – przedstawiono wyniki badań dokładności wymiarowo-kształtowej na modelach testowych, w tym na modelach cienkościennych reprezentujących potrzeby przemysłu samochodowego,

Rozdz.6. Badania modeli geometryczno-strukturalnych GMTPS – przedstawiono wyniki badań modeli powierzchniowo-strukturalnych pod kątem topografii powierzchni i dokładności wymiarowo-kształtowej,

Rozdz. 7. Badania porównawcze modelu GMTPS wykonanego metodą obróbkową – zawiera wyniki badań porównawczych dotyczących geometrycznych i dokładnościowych cech modeli wytwarzanych przyrostowo i ubytkowo – CNC,

Rozdz. 8. Badania wybranych właściwości mechanicznych materiałów – przedstawiono wyniki badań podstawowych właściwości materiałów zastosowanych w obu ww. technologiach,

Rozdz. 9. Metodyka wyboru rapid technologii i jej zastosowanie – przedstawiono ogólne spostrzeżenia Autora odnoszące się do kryteriów wyboru technologii addytywnych w praktyce,

Rozdz.10. Wnioski końcowe, elementy oryginalne pracy oraz kierunki dalszych badań.

Cel i zakres pracy można uznać za poprawny, przyjęte metody i techniki określania parametrów powierzchni jak i dokładności odtworzenia fizycznych modeli materiałowych są też uzasadnione, ale można zadać pytanie dlaczego na początku pracy Autor nie zdefiniował pełnego planu eksperymentu dostosowanego do realizacji założonych celów badawczych, co powinno znamionować metodologicznie ujętą pracę doktorską.

3. Ogólna ocena pracy

Generalnie, Autor solidnie przygotował się realizacji tematu pracy i zakresu pracy, która zwiera bardzo szeroki obszar badań eksperymentalnych. Praca jest zredagowana wyjątkowo starannie, ale jej eksperymentalna szeroka zawartość, nie zdefiniowana na początku jako plan eksperymentu, utrudnia śledzenie głównych metod osiągnięcia celów, co jest również jednym z podstawowych wyróżników dysertacji składającej się właśnie z precyzyjnego postawienia celów, właściwego doboru metod badawczych oraz właściwej interpretacji wyników badań. To taka jest właśnie rola planu eksperymentu aby możliwie precyzyjnie zaplanować badania eksperymentalne i zrealizować je przy minimum nakładów finansowych i czasowych. W tym przypadku kiedy mamy wieloparametryczne eksperymenty można też zastosować metodę optymalizacji programu badawczego.

Należy uznać, że Autor bardzo starannie opracował metody konwersji modeli wirtualnych do formatów STL, szacowania ich dokładności jak i określania parametrów powierzchni. Liczba analizowanych przypadków jest bardzo duża i obszerna. Autor bardzo duże fragmenty pracy poświęca na opis metod, technologii, norm i technik pomiarowych czy też urządzeń, które są już powszechnie znane. Postawione cele badawcze Autora można było też zmieścić w pracy o dwukrotnie mniejszej objętości, ale Autor postanowił tę pracę zredagować na bardzo wysokim poziomie graficznym. Moim zdaniem Autor potraktował bardzo pobieżnie bardzo ważne zagadnienia w technologiach generatywnych odnoszące się do parametryzacji procesu technologicznego, w tym parametrów technologicznych wytwarzanych modeli, własności materiałów czy też aspektów ekonomicznych. To jest bardzo istotna wiedza technologiczna o wielkim znaczeniu praktycznym. Autor pracy chyba zbyt dużo pracy poświęcił na bardzo dokładne pomiary odchyłek (pojedyncze mikrometry, a nawet nanometry) modeli rzeczywistych od geometrii wirtualnej, co w praktyce nie ma bardzo dużego znaczenia, zwłaszcza dla elementów wytwarzanych z tworzyw sztucznych, o bardzo prostych funkcjach użytkowych. Autor jest zafascynowany nowymi technologiami wytwarzania a zwłaszcza technikami pomiarów geometrycznych.

Głównym mankamentem bardzo wartościowej pracy eksperymentalnej jest brak przekonującego wyjaśnienia otrzymanych wyników i odpowiedzi na pytanie **dlaczego?** Jest to istotą każdej pracy naukowej. Inwentaryzacja i klasyfikacja uzyskanej wiedzy technologicznej jest bardzo ważna, ale jest to tylko bardzo ważna wiedza ekspercka Autora pracy, w której bardzo skąpo Autor ustosunkowuje się do uogólnienia zależności związanych z parametrami technologicznymi i uzyskanej geometrii obiektów fizycznych, a jest to istotne z punktu widzenia obróbki powierzchniowej wykończeniowej. Autor pracy wykonał bardzo dużo eksperymentów technologicznych i zapewne może zidentyfikować tę wiedzę na przykładzie wybranych modeli fizycznych elementów i należy sądzić, że przedstawi to w swoich przyszłych publikacjach, wszak technologia to jest odpowiedź na pytanie **co wykonać ? i jak wykonać?** i w każdym przypadku należy odpowiedzieć na pytanie **dlaczego?** Zatem ważnym czynnikiem byłoby związanie uzyskanych wyników oceniających dokładność wymiarowo-kształtową i chropowatość powierzchni budowanych modeli fizycznych z parametrami technologicznymi przy różnych grubościach warstwy (tym bardziej, że w pkt 8 programu badań – str. 41 Autor taki cel założył). Dokładność wymiarowo-kształtowa i chropowatość powierzchni są nierozzerwalnie związane z parametrami procesu technologicznego. Tak zdefiniowana zależność jest wówczas technologiczną wiedzą dostępną dla szerokiej grupy technologów posługujących się AM. To jest też zawsze jednym z celów prac doktorskich. Szkoda, że Autor pracy mając tak obszerny materiał badawczy nie pokusił się o zdefiniowanie reguł i procedur zawierających wpływ parametrów technologicznych nie tylko na dokładność

geometryczną, wymiarową i powierzchniową, ale również na ekonomikę i efektywność procesów, gdyż te czynniki będą decydujące czy te technologie znajdą szerokie zastosowanie w przemyśle (Autor to zawarł w głównych celach swojej pracy – str. 39). Wprawdzie Autor przedstawił pośrednią metodę szacowania kosztów wytworzenia modeli fizycznych na podstawie czasu generowania modeli i objętości przetworzonego materiału, ale dobrze byłoby to związać z parametrami technologicznymi, głównie z grubością generowanej warstwy. Ma to również wpływ na czas wytwarzania ale jest również bardzo istotny z punktu widzenia czasu trwania procesu jak i kosztów obróbki wykończeniowej. Byłoby to bardzo efektywne zintegrowanie wszystkich celów pracy, zarówno praktycznych jak i metodologicznych. Można to traktować dyskusyjnie jako życzenie czy też wskazanie recenzenta co nie znaczy, że praca jest mało wartościowa.

Jednoznacznie stwierdzam, że jej zawartość technologiczna, badawcza a zwłaszcza aplikacyjna jest bardzo szeroka i wystarczająca aby ją uznać jako pracę doktorską, co nie oznacza, że nie zawiera problemów dyskusyjnych.

Autor wykonał tytaniczną pracę eksperymentalną, bardzo ważną z punktu widzenia jej aplikacji w przemyśle.

4. Konkluzja końcowa

Przedłożona do recenzji praca jest oryginalnym opracowaniem Autora przydatnym w modelowaniu procesów wytwarzania z pomocą technologii generatywnych, a zwłaszcza technologii SLS, FDM i PolyJet. Głównym celem pracy było poszukiwanie najdokładniejszych metod transformacji geometrycznych modeli CAD3D do formatu STL stosowanym w technologiach addytywnych. Ten cel pracy Autor zrealizował w pełni.

Postawione teoretyczne cele i zadania badawcze Autor poddał starannej weryfikacji eksperymentalnej, która potwierdziła przyjęte założenia. Wskazuje to na Jego dociekliwość i rzetelność w rozwiązywaniu interdyscyplinarnych problemów naukowych oraz dowodzi, że Autor posiada dobre rozeznanie w prezentowanej tematyce i umiejętności w stosowaniu naukowych metod i narzędzi do rozwiązywania zagadnień technicznych. Postawione zadania badawcze rozwiązał w sposób poprawny a interpretacja uzyskanych wyników wskazuje na Jego dojrzałość jako badacza i predyspozycje oraz przygotowanie do pracy naukowej.

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji praca doktorska mgr inż. **Ireneusza CENY** zatytułowana : **„Dokładność odwzorowania modeli wirtualnych w wybranych metodach rapid technologii”** spełnia wymagania ustawy ds. tytułu i stopni naukowych i stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

