

OCENA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Ireneusza CENY pt.
Dokładność odwzorowania modeli wirtualnych w wybranych metodach
rapid technologii

Podstawa opracowania: pismo Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej prof. dr hab. inż. Jarosława Sępa z dnia 19 grudnia 2016 roku na podstawie decyzji Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa z dnia 14 grudnia 2016 roku.

1. Wprowadzenie

Analiza dokładności odwzorowania prototypu jest jednym z podstawowych kryteriów decyzyjnych w procesie doboru technologii do wytwarzania określonych wyrobów ale również podczas zakupu danej technologii i wdrożenia jej przez podmiot gospodarczy.

Osoby odpowiedzialne za produkcję w firmach stale zadają sobie pytanie w jaki sposób przyspieszyć proces produkcyjny przy zachowaniu określonych założeń konstrukcyjnych w tym dokładności geometrycznej wyrobu. Rozwój systemów przyrostowych – rapid technologii powoduje, że coraz częściej korzysta się z nich nie tylko w obszarach badawczych ale również w praktyce przemysłowej, medycynie czy warunkach domowych.

Zwiększający się udział rapid technologii w obszarze technik wytwarzania stosowanych w przemyśle powoduje, że tematyka podjęta w rozprawie przez Doktoranta dotycząca analizy dokładności odwzorowania modeli wirtualnych w wybranych metodach rapid technologii należy do grupy zagadnień ważnych z punktu widzenia poznawczego i użytkowego.

2. Struktura pracy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Ireneusza CENY pt. „*Dokładność odwzorowania modeli wirtualnych w wybranych metodach rapid technologii*” liczy 350 stron w skład których wchodzi 10 rozdziałów, bibliografia, załączniki spis rysunków, spis tablic i streszczenie w języku polskim i angielskim. Bibliografia obejmuje 237 pozycji ze źródeł krajowych i zagranicznych. Zdecydowana większość cytowań stanowi aktualne opracowania uwzględniające publikacje naukowe, raporty, katalogi i normy. Strona edycyjna została przygotowana bardzo starannie. Brakuje jednak w drugim rozdziale powołań na źródła w tekście oraz dla rysunków 2.1 – 2.4 oraz 2.6 i 2.7, które można od wielu lat zauważyć w oryginale m.in. na stronach internetowych producentów i dystrybutorów systemów FDM, SLS i PolyJet.

Pierwsze trzy rozdziały zgodnie z ogólnie przyjętym układem dysertacji stanowią kolejno wstęp, analizę stanu zagadnienia oraz wynikające z tego, sformułowane w trzecim rozdziale cel, hipotezę i zakres pracy.

W rozdziale czwartym opisany jest program badań, metodyka badań oraz modele badawcze opracowane jako autorskie na potrzeby prowadzonych w późniejszych częściach pracy analiz.

W rozdziałach piątym i szóstym przedstawione są wyniki badań i ich analiza w obszarze dokładności wymiarowo-kształtowej wybranych elementów geometrii modeli (FDM, SLS, PolyJet) oraz struktury geometrycznej powierzchni. Autor skrótowo zakodował modele jako GMT – Geometryczny Model Testowy i GMTC – Geometryczny Model Testowy Cienkościenny.

Rozdział siódmy dotyczy porównania modeli wykonanych metodą przyrostową i ubytkową zakodowanych w skrócie jako GMTPS – Geometryczny Model Testowy Powierzchniowo - Strukturalny.

W rozdziale ósmym opisane są badania wybranych właściwości mechanicznych przeprowadzone na próbkach wykonanych z zastosowaniem różnych technologii przyrostowych (FDM, SLS, PolyJet i dodatkowo CJP).

Rozdział dziewiąty przedstawia możliwości wytwarzania prototypów funkcjonalnych z zastosowaniem rapid technologii na przykładzie wybranych elementów nadwozia samochodu. Zostały tu sformułowane wytyczne wyboru technologii przyrostowych do wytwarzania prototypów, które są właściwie wnioskami z przeprowadzonych w pracy analiz. Biorąc to pod uwagę rozdział dziesiąty moim zdaniem powinien zostać włączony w strukturę rozdziału poprzedniego i częściowo drugiego, ponieważ zawiera pewne elementy ogólnej analizy zagadnienia.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Ireneusza CENY dotyczy analizy odwzorowania modeli wytworzonych z zastosowaniem wybranych rapid technologii w tym przypadku technologii addytywnych. Autor wybrał do badań w zasadzie trzy technologie, w których do wytwarzania modeli stosowane są materiały polimerowe, kształtowane odpowiednio w metodzie FDM przez wytłaczanie warstwowe filamentu termoplastycznego, w metodzie SLS przez spiekanie warstwowe proszku wiązką lasera i w metodzie PolyJet przez fotopolimeryzację nadrukowanej warstwami żywicy z użyciem światła emitowanego z lampy UV. Technologie te są szeroko stosowane w praktyce przemysłowej i można je uznać za reprezentatywne mimo, że reprezentują tylko trzy spośród sześciu podstawowych procesów stosowanych w przyrostowych systemach wytwarzania. W rozdziale ósmym przedstawione są dodatkowo wyniki badań właściwości mechanicznych próbek wykonanych metodą CJP (dawniej 3DP) wytwarzane przez sklejanie warstwowe proszku z możliwością teksturowania powierzchni modeli. Pojawia się pytanie po analizie wyników czy jest sens porównywania właściwości mechanicznych tych modeli w zasadzie stosowanych wyłącznie jako wizualne z modelami o charakterze funkcjonalnym. W tym przypadku ogólnie jest wiadomo, że wytrzymałość modeli wykonanych metoda CJP jest bardzo mała (nawet przy zastosowaniu infiltracji) w zasadzie nieporównywalna z wytrzymałością modeli polimerowych wytwarzanych np. metodą FDM czy SLS. Wykonano również porównanie dokładności geometrycznej prototypów wytwarzanych przyrostowo (FDM, SLS i PolyJet) z prototypami wytworzonymi metodą ubytkową ze stopu aluminium przy użyciu centrum obróbczego CNC. To uważam za

celowe, ponieważ ze strony tzw. przemysłu często pojawiają się tego typu zapytania. Biorąc to wszystko pod uwagę należy zauważyć, że praca zdecydowanie ma charakter empiryczny.

Analiza stanu zagadnienia odnosi się do aktualnych źródeł literaturowych, jednak sama klasyfikacja metod przyrostowych jest spłycona do podziału uwzględniającego postać materiału tylko w odniesieniu do analizowanych w pracy metod i procesów (FDM, SLS, PolyJet).

Jak wcześniej wspominałem wyróżnia się sześć (niektórzy autorzy wyróżniają siedem) podstawowych procesów stosowanych w przyrostowych systemach wytwarzania. Można się z tym spotkać m.in. w najnowszych wydaniach Raportu Wohlersa (w pracy brak jest odniesienia do tego źródła). Aby to uzmysłowić Autorowi rozprawy przedstawiam poniżej przykładową klasyfikację:

- fotopolimeryzacja objętościowa (FO) m.in. dla technologii SLA i 3SP,
- wytłaczanie materiału (WM) m.in. dla technologii FDM, MEM, FFF,
- druk płynnym materiałem (DPM) m.in. dla technologii PolyJet, ProJet, MJM,,
- spajanie proszku drukowanym klejem (SPDK) - 3DP (obecnie CJP), VoxelJet
- laminacja arkuszy materiału (LAM) m.in. dla technologii LOM, Encore, SDL
- spajanie proszku dostarczoną energią (SPDE) m.in. SLS, SLM, DMLS, ERM.

Należy tu wyróżnić dwa rodzaje skrótów: pierwszy odnoszący się do samego procesu i drugi rodzaj skrótu związany w konkretnym procesem stosowanym w określonym urządzeniu, który najczęściej stanowi nazwę własną procesu, objętą dodatkowo ochroną prawną przez producenta urządzenia.

Budowanie schematów obejmujących różne sposoby klasyfikacji jest zawsze dyskusyjne i będzie w przypadku braku w przyszłości jednoznacznych definicji podstawowych procesów addytywnych. Podobnie odnosi się to do klasyfikacji rapid technologii, gdzie czasami podział np. pomiędzy Rapid Manufacturing i Rapid Tooling może nie być możliwy do jednoznacznego określenia.

Autor rozprawy za zasadniczy jej cel obrał sobie przeprowadzenie oceny parametrów geometrycznych modeli wykonanych wybranymi technologiami przyrostowymi, co jest sformułowane w tytule z uwzględnieniem właściwości materiałowych, uwzględniając również koszty wytwarzania. Opracował w tym celu szereg autorskich modeli geometrycznych umożliwiających szeroki zakres analizy.

Przedstawiona hipoteza jest właściwie stwierdzeniem oczywistych zależności i mogłaby być pominięta w pracy o charakterze doświadczalnym, jednak często ze względów zwyczajowych ale i porządkowych wielu autorów decyduje się na taką formułę, która pozwala na prowadzenie badań, które mogłyby czasami podważyć jej oczywistość.

Program badań przedstawiony w rozdziale czwartym oparty jest na opracowanych modelach testowych zaprojektowanych w wyniku analizy spotykanych w literaturze testowych modeli geometrycznych. Zaprezentowane modele pozwalają na przeprowadzenie bardzo szerokiej analizy geometrycznej m.in. kształtów stożkowych, walcowych, wielokątnych, krzywoliniowych z promieniami wewnętrznymi i zewnętrznymi i elementów cienkościennych. Autor zakodował skrótami poszczególne modele o czym już wcześniej była mowa. Należy się zastanowić czy tak duża liczba modeli pozwala na przejrzystą analizę wyników, moim zdaniem obszerność materiału badawczego może wprowadzić szum informacyjny w interpretacji wyników. Z modeli badawczych jeden został przeznaczony do analizy geometryczno – strukturalnej (GMTPS) w różnych ułożeniach w przestrzeni roboczej drukarek 3D. Moim zdaniem modele GMT i GMTCS powinny być w całości lub w części wytworzone również w kilku położeniach względem układu współrzędnych maszyny

roboczej. Pozwoliłoby to w pierwszym etapie określić przede wszystkim możliwość wykonania tego typu elementów w tym ich oczyszczenia z konstrukcji podpierających (jeżeli takie są stosowane). Badania te mogłyby być tu wykonane w zastępstwie bardzo szczegółowych analiz geometrycznych. Możliwość wytworzenia (wydruku 3D) modelu o określonej w różnych położeniach jest niezwykle istotną informacją i powinna zostać postawiona na pierwszym miejscu.

Wyniki analiz modeli GMT i GMTC przedstawione są bardzo obszernie w rozdziale piątym zakończonym równie obszernymi wnioskami i porównaniami wyników pomiarów różnych modeli. Brakuje tu wynikających bezpośrednio z analizy zaleceń kierunkowych w zakresie możliwości podwyższenia dokładności geometrycznej prototypów wytwarzanych określoną metodą. Odnosząc się poprzedniej uwagi dotyczącej zmian położenia prototypów w przestrzeni roboczej część wniosków mogłaby zmienić swój charakter. Pomiary wykonano zastosowaniem urządzenia CT Metrotom i GOM ATOS II. Pojawia się pytanie czy celowe było wykonywanie pomiarów urządzeniem CT Metronom. Tabela przedstawia odchyłki wymiarów w zadanym przekroju, oprogramowanie GOM Inspect stwarza możliwości różnorodnych analiz trójwymiarowych, analizę tego typu przedstawiono w załączniku B i C.

Modele GMTPS poddano badaniom dokładności wymiarowo-kształtowej i struktury geometrycznej powierzchni z zastosowaniem stykowych i bezstykowych metod pomiarowych w tym także tomografii komputerowej. I tu znowu pojawia się pytanie w jakim celu użyto tych metod pomiarowych, czy np. dla potwierdzenia wyników. Temat pracy dotyczy analizy dokładności geometrycznej prototypów a nie doboru metody pomiarowej. Biorąc to pod uwagę Autor we wstępnym etapie realizacji pracy powinien dokonać wyboru metody pomiarowej i systemu pomiarowego np. z zastosowaniem urządzenia GOM i stosować do wszystkich pomiarów. Dzięki temu praca nie straciła by nic na wartości merytorycznej a analiza wyników w obszarze jednego systemu pomiarowego znacznie poprawiła by jej czytelność. Odnosi się to również do badań struktury geometrycznej powierzchni. Uwaga ta jednak nie umniejsza wartości merytorycznej pracy a odnosi się do jej samej organizacji. Rozdział ten zakończony jest wnioskami, których charakter może mieć wartość poznawczą pozwalającą na sformułowanie zaleceń dla procesów technologicznych.

Analiza modelu GMTPS wykonanego ze stopu aluminium z zastosowaniem centrum obróbczego CNC stanowi ciekawy materiał porównawczy względem prototypów wykonanych metodami przyrostowymi. Oczywiście pojawia się pytanie czy można porównywać modele wykonane ze stopu aluminium z prototypami wykonanymi z materiałów termoplastycznych czy fotopolimerów w procesie addytywnym. Odpowiedź jest prosta – można, jednak szczególnej wartości poznawczej na pewno dałoby porównanie modeli wykonanych przyrostowo z modelami wykonanymi ubytkowo z takich samych materiałów. Zakres tej i tak obszernej pracy byłby jednak w takim przypadku o wiele przekroczony, a tą uwagę należy traktować jako temat do dalszych badań. Wnioski z tego rozdziału mają charakter zdecydowanie użyteczny.

Uzupełnieniem treści pracy o badania właściwości mechanicznych jest wykraczający poza jej główny nurt tematyczny rozdział ósmy. Przedstawione wyniki badań i ich analiza pozwoliła na sformułowanie wniosków, w zasadzie luźno powiązanych z zasadniczym tematem pracy chociaż z punktu widzenia poznawczego ciekawych. Wartość tych wniosków zdecydowanie podniosłaby próba analizy właściwości mechanicznych w aspekcie dokładności wymiarowo-kształtowej prototypów, co jednak może być tematem odrębnym na opracowanie naukowe. Biorąc to pod uwagę widać, że przedstawiony w rozprawie

materiał pobudza w wielu przypadkach do szukania dalszych treści do analiz, co należy uznać za bardzo pozytywną cechę tej dysertacji.

Podsumowanie całej pracy zawarte jest w rozdziale dziewiątym przedstawionym jako metodyka wyboru rapid technologii w aplikacjach o charakterze przemysłowym. Wybór technologii przyrostowej został oparty o kryteria dokładności wymiarowej, czasu wytwarzania oraz próbie oszacowania kosztów wytwarzania. Analizy te zostały odniesione do wyrobów seryjnych (podłokietnika drzwi, klamki i nakładki). Autor nie podaje szczegółów konstrukcyjnych i technologicznych tych elementów takich jak materiał wyrobu i sposób wykonania, które są zapewne objęte tajemnicą firmy, jednak pewne informacje ogólne np. wytwarzanie przez wtrysk nie są szczególną tajemnicą a zwiększyłby wartość analizy. Jak wspominałem wcześniej rozdział dziesiąty powinien być częścią dziewiątego, ponieważ zawarte w nim wnioski są często uogólnieniami lub powtórzeniami wcześniejszych stwierdzeń i nie zawsze w pełni trafne czy prawdziwe. Dla przykładu w punkcie 4 str. 234 Autor stwierdza, że niedokładności modelu wytwarzanego metodą PolyJet spowodowane są naprężeniami powstałymi w procesie tworzenia wyrobu, nie podając jakiego etapu wytwarzania wyrobu czy np. nakładania warstw materiału, czy samej fotopolimeryzacji czy rozmieszczenia konstrukcji podpierających a może procesu czyszczenia z podpór lub suszenia wyrobu.

Natomiast w punkcie 9 str. 235 Autor stwierdza, że wyrób uzyskany metodą ubytkową ma znacznie lepsze właściwości mechaniczne niż wykonane z zastosowaniem rapid technologii. Jest to zbyt duże uogólnienie i do tego nie do końca prawdziwe, aby taki wniosek wysnuć należałoby porównać parametry wytrzymałościowe próbek wykonanych z tego samego materiału z zastosowaniem metody ubytkowej i przyrostowej. Jak wiadomo technologie przyrostowe oparte o selektywne spajanie proszków metali (SLS, DMLS czy SLM) pozwalają na wytwarzanie wyrobów o bardzo dobrych parametrach wytrzymałościowych również ze stopów aluminium. I tu nasuwa się dodatkowo uwaga, że Autor w obszarze przeglądu literatury odniósł się tylko do metody SLS obejmującej spajanie wiązką lasera proszków polimerowych pomijając inne materiały możliwe do spiekania warstwowego.

Przeprowadzone badania doświadczalne i ich bardzo szczegółowa analiza udowodniły w zasadzie słuszność przyjętych założeń i pozytywnie zweryfikowały hipotezę pracy. Cel pracy został osiągnięty. Metodyka badań oraz otrzymane wnioski z badań eksperymentalnych stanowią w znacznej części oryginalny wkład Autora w dyscyplinę Budowa i eksploatacja maszyn. Stwierdzam jednocześnie, że mimo uwag, właściwie o charakterze dyskusyjnych, bardzo wysoko oceniam poziom merytoryczny rozprawy, przede wszystkim ze względu duży nakład pracy badawczej oraz na wyczerpującą analizę otrzymanych wyników w aspekcie naukowym i użytkowym.

Można jednak zadać pytanie, czy wykonanie tak dużej ilości prac badawczych było uzasadnione z punktu widzenia sformułowanych wniosków. Jest to pytanie po części z obszaru teorii eksperymentu. Często można spotkać się z sytuacją w której bardzo pracowici autorzy rozpraw trwają w niedosyć badawczym trudnym do zdiagnozowania z punktu widzenia samego autora. Jednak również rolą recenzenta jest zmotywowanie autora do spojrzenia na swoją pracę z dystansu, który pozwoli w przyszłych badaniach uzyskać lepszą efektywność pracy badawczej.

4. Podsumowanie

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

- struktura i formalny układ pracy jest prawidłowy a strona edycyjna w zasadzie wzorowa,
- tematyka odnosząca się do obszaru stosunkowo nowych technologii addytywnych została dokonana w sposób trafny, a jej zakres spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim,
- rozprawa odnosi się do aktualnej wiedzy i praktyki objętej jej zakresem, a w wielu elementach wnosi nowe treści,
- cele zasadnicze pracy zostały w pełni osiągnięte w zakresie przyjętym przez Autora,
- hipoteza pracy została uzasadniona, a prezentowane wyniki uzyskano w poprawnie przeprowadzonym procesie badawczym,
- założenia przyjęte w pracy i opracowane modele własne i mogą być przedmiotem dalszych prac badawczych.

Mgr inż. Ireneusz Cena w dysertacji podjął się bardzo trudnego i ambitnego zadania, które z oczywistych względów nie wyczerpuje całości zagadnień związanych rapid technologiami. Wynika z tego konieczność dalszych badań, a przedmiotowa praca stanowi punkt wyjściowy do opracowania kolejnych analiz dla kolejnych metod przyrostowych a może również metod hybrydowych.

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. Ireneusza Ceny pt.: *„Dokładność odwzorowania modeli wirtualnych w wybranych metodach rapid technologii”* (promotor: dr hab. inż. Andrzej Kawalec, prof. PRz) spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku, a Autor może być dopuszczony do jej publicznej obrony.

