

Dr hab. inż. Mariusz Sobolak
Katedra Konstrukcji Maszyn
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza
Al. Powstańców Warszawy 8
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 2015-03-11

RECENZJA

Pracy doktorskiej mgr inż. Jacka Bernaczka

pt. „Techniki szybkiego prototypowania w procesie projektowania i wdrażania do produkcji elementów konstrukcji lotniczych”

wykonanej pod kierunkiem

prof. dr hab. inż. Romany Śliwy

Podstawa recenzji:

pismo Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej dr hab. inż. Jarosława Sępa, prof. PRz z dnia 13 lutego 2015 roku nr RM- 530-10-03/2015 na podstawie decyzji Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa z dnia 11 lutego 2015 roku.

1. Wprowadzenie

Techniki szybkiego prototypowania znajdują coraz szersze zastosowanie w przeróżnych gałęziach przemysłu. Przemysł lotniczy z uwagi na swoją specyfikę, w tym głównie wymagania stawiane elementom konstrukcji, jest „hermetycznym” środowiskiem, w którym wszelkie innowacje traktowane są nieufnie. Mając to na uwadze, uważam iż tematyka podjętych badań jest innowacyjna i słuszna.

Praca mgr inż. Jacka Bernaczka pt. „Techniki szybkiego prototypowania w procesie projektowania i wdrażania do produkcji elementów konstrukcji lotniczych” liczy 197 stron. Składa się z czterech głównych rozdziałów, podzielonych na podrozdziały.

Początkowa część zawiera spis treści, wstęp i wykaz oznaczeń, natomiast w końcowej części Autor zamieścił bibliografię i streszczenie.

Zamieszczony spis literatury obejmuje 165 pozycji krajowych i zagranicznych, w tym publikacje których jest współautorem w liczbie 19 (publikacje i referaty konferencyjne).

2. Opis rozprawy

Wprowadzeniem do badań własnych jest Rozdział 1 „Analiza stanu zagadnienia”, w którym Autor przedstawia analizę literaturową zagadnień, którymi się zajmuje. Znajdujemy tu klasyfikację metod RP (RapidPrototyping), przy czym Autor przedstawia bliżej 4 techniki, które wykorzystuje we własnych badaniach. Przedstawia również informacje o formacie plików wykorzystywanych w RP. Jeden z podrozdziałów poświęcony jest podstawom elastoptyki. Podsumowując rozdział Autor przedstawia krytyczną analizę stanu wiedzy, będącą podstawą do sformułowania celu i zakresu pracy. Cele pracy są jasno postawione podobnie jak przedstawiony zakres pracy.

Drugi, najobszerniejszy rozdział pracy to badania własne.

Autor opisuje tu w jaki sposób wykonał modele testowe używając różnych metod RP.

W rozdziale tym możemy znaleźć:

- szczegółowo opisany sposób wykonania modeli testowych różnymi metodami RP,
- analizę dokładności wymiarowej modeli RP (pomiarów współrzędnościowych i bezdotykowych),
- analizę powierzchni otrzymanych modeli,
- badania podstawowych właściwości zastosowanych materiałów modelowych,
- badania elastoptyczne wybranych elementów,
- badania stanowiskowe wybranych elementów.

Rozdział trzeci przedstawia analizy otrzymanych wyników, chociaż analizy takie już są wstępnie wykonywane w rozdziale drugim.

Rozdział czwarty to wnioski końcowe. Najważniejsze zdaniem Autora wnioski zostały przedstawione w punktach.

3. Uwagi szczegółowe

s. 8: Rys. 1.1.1 – to raczej nie jest algorytm tylko schemat przepływu danych.

s. 13: Powołania na rysunek po rysunku: rys. 1.3.1.

s. 7: Stwierdzenia nie poparte badaniami własnymi ani literaturą: „ze względu na wysoką dokładność odwzorowania modelu CAD, techniki szybkiego prototypowania są wykorzystywane w procesie wdrażania do produkcji nowych elementów konstrukcji lotniczych”.

s. 11: „Bardzo wysoka dokładność modeli SLA i JS”... czyli jaka? (to zostanie dopiero wykazane w dalszej części pracy, stwierdzenia takie raczej powinny znaleźć się we wnioskach a nie we wstępie) .

Używanie przemiennie „własności” i „właściwości” (wielokrotnie).

s. 11. „Prowadzone dotychczas badania z zakresu przestrzennego wydruku woskowego wykazały...”
– brak powołania na literaturę, należało zaznaczyć, iż są to badania własne.

s. 11/12: „Po rozformowaniu modelu RP forma zostaje zalana woskiem odlewniczym” – trochę za bardzo uproszczone, nie tak od razu...

s. 12.: Wytwarzane w oparciu o techniki RP woskowe modele odlewnicze mają również zastosowanie w przemyśle lotniczym” – brak literatury, badania własne?

s. 16: Wektor normalny – nie zawsze można go określić, ponieważ trójkąt może być zdegradowany, czyli punkty mogą leżeć na jednej prostej – stąd czasem błędy w plikach STL!

s.17: „Celem pomiaru postaci geometrycznej jest sprawdzenie czy model RP spełnia wymagania konstrukcyjne” – niejasne.

s. 18: Rys. 1.5.1 – nie są zachowane proporcje (rysunek może być w skali), w opisie 0,2mm, 0,15 mm, 0,1 mm, na rysunku proporcje 3:2:1.

s.18: „Modele SLA posiadają bardzo dobrą obrabialność, dlatego można dla nich stosować wszystkie rodzaje tolerancji” – sformułowanie niejasne i nieprecyzyjne.

s. 19: „Należy podkreślić...” – to powinno być we wnioskach.

s. 20: „...nie wchodzić w reakcje z silikonami do formowania”. – zbyt ogólnie: „formowania”.

s.21. „... dzięki temu można budować większe modele elementów konstrukcji lotniczych”... za często pojawia się stwierdzenie: „konstrukcji lotniczych” – w zasadzie do wszelkich elementów konstrukcji, nie tylko lotniczych – lotnictwo nie ma tu wyłączności. W pracy rozważane są przykłady elementów konstrukcji lotniczych, ale nie uprawnia to do stwierdzeń wyłączających inne branże przemysłu.

s. 2.1: „Elementy składowe systemów FDM są takie same jak w innych technikach RapidPrototyping.” – niezrozumiałe i niezbyt prawdziwe!

Powtórzenia „dokładność”, „grubość warstwy” ...

s. 22: (FDM) „zazwyczaj termoplastycznego” – jakie jeszcze inne tworzywa są stosowane w FDM?

s.23: „Materiał podporowy ten jest stosunkowo łatwo usuwalny gdyż nie jest on złączony z wykonywanym elementem” – co utrzymuje zatem model na podporach? Czyżby grawitacja?

s.23: ABS użyty do wykonania prototypu piasty – jeszcze nic nie wiadomo o żadnej piście, niepotrzebne „wtrącenie”.

s. 25.: Powołanie na rys. 2.10.1 – błędne, powinien być rys. 1.6.4

s.26.: Uwaga o konieczności modelowania hybrydowego nie jest słuszna. Nie zawsze jest konieczne stosowanie modelowania hybrydowego. Nie zawsze konieczne jest także przekształcanie modelu powierzchniowego do bryłowego w celu eksportu do formatu STL.

s.26.: Powtórzenie: „Formaty zapisu plików są rozwijane...” – to już było!

s.27. Nie zgodzę się ze stwierdzeniem, że: „Dokładność aproksymacji jest zależna od kształtu powierzchni”.

s.27. Rys. 1.7.1 należało opisać dokładniej (i powinien być czytelniejszy).

s. 27. Rys. 1.7.2 – nieczytelny (podobnie jak wiele zrzutów ekranowych w dalszej części pracy – dlaczego są one takie maleńkie?).

s.27: „... należy ponownie wygenerować format STL” – przejście? Chyba model STL.

s.28: Wielkość uzyskanego efektu elastooptycznego jest funkcją panujących w nim naprężeń []? naprężenia nie „panują” tylko występują i nie występują w efekcie elastooptycznym, tylko efekt elastooptyczny jest rezultatem występujących naprężeń.

s. 29. Nie „uzyskując” tylko „na uzyskaniu”.

s. 33. „Na młotach i prasach można wykonywać odkuwki o dowolnych kształtach []” – przesadzone stwierdzenie, o złożonych, skomplikowanych ale nie dowolnych.

s.33. „Proces opracowania technologii kucia matrycowego dla danej części, w tym elementu konstrukcji lotniczej, może być wspomagany przez techniki szybkiego prototypowania na etapie klasycznej – analitycznej – metody przygotowania, jak również analiz numerycznych” - ???? proszę o podanie w jaki sposób, dlaczego wyróżniono części lotnicze, i jak RP może pomóc w metodach analitycznych i numerycznych.

s. 34. Znowu kucie – „co ma piernik do wiatraka”? – całą część poświęconą kuciu należałoby usunąć z pracy. Nie znalazłem w pracy związku pomiędzy RP a samym procesem kucia. Możliwość wytworzenia prototypu o kształcie odkuwki to stanowczo za mało, aby wyciągać takie wnioski.

s.35. Ponownie rozwijane akronimy CAD, STL, RP – to już było.

s.37. Brak rozwinięcia akronimu SEM.

s.38. Formatowanie – różna wielkość czcionki, brak rozwinięcia akronimu ASTM, co oznacza „@” przed naprężeniami w tabelce?, tabelkę można było przeformatować przejrzysiej.

s.39: „maszyny pomiarowe Wenzel” – to producent, a typ maszyny?

s.40: niefortunne sformułowanie; „wielkość i kształt trójkątów można regulować...”.

s.40; „dokładność aproksymacji jest zależna od kształtu powierzchni modelu...” – nie, ponieważ kształt jest jaki jest a my go mamy przybliżyć z zadaną dokładnością.

s.41. Powinno być „3DLightyear” a nie „3DLightyer”.

s.41. Powołanie na rysunek 2.3.3 po rysunku.

s. 45: „W przypadku stwierdzenia błędów lub braków warstwy należy ponownie przeliczyć platformę (pliki dla maszyny).” – to nic nie zmienia, to samo zadanie komputer wykona identycznie, to nie jest przecież losowe działanie, należy przekonstruować platformę i dopiero wówczas „przeliczyć”!

s.47: Rys. 2.3.17 – powołanie po rysunku.

s. 48: „kolejną z przeprowadzonych dla piasty koła samolotu metod szybkiego prototypowania jest...” – niefortunne sformułowanie.

s. 49: „Po upewnieniu się, że pozycja modelu jest optymalna...” – no nie jest, przedmiot jest pod kątem 45° - powoduje to powstawanie najgłębszych rowków w schodkowej strukturze.

s. 52: „... wyczyszczono głowicę i platformę.... operacje zrealizowano automatycznie” – wyczyszczono raczej ręcznie, z tego co widać na rys. 2.3.29.

s.54: Powołanie na rys. 2.3.32 po rysunku.

s.54: „stosuje się cienką dyszę zapewniającą większe ciśnienie”.... nie ciśnienie, tylko prędkość strugi wody, ciśnienie jest akurat atmosferyczne, wysokie ciśnienie jest w aparaturze, spada ono na wylocie dyszy do ciśnienia atmosferycznego.

s. 55: „dopasowano do siebie obydwie strony” – niefortunne sformułowanie.

s. 56: „...dla których docelowym materiałem będzie lotniczy stop magnezu i aluminium”.. Co to za stop magnezu i aluminium? Chyba powinno być „magnezu lub aluminium”.

s.56: „...wysoka dokładność metody i stosunkowo krótki czas” (o metodzie FDM)... a akapit dalej „skurcz materiałowy, niejednorodna (włóknista) struktura.... Albo dokładna albo niedokładna.

s. 57: Powołanie na rys. 2.4.3 po rysunku.

s. 58: Powołanie na rys. 2.4.4 po rysunku.

s. 58: „...wymuszającym na module CAD/STL przeprowadzenie indywidualnych relacji matematycznych”. O co chodzi? Jakich relacji?

s.59: „...wg ściśle określonych algorytmów ustawia modele w optymalnych dla procesu położeniach” – niekoniecznie, tylko z uwagi na rozmieszczenie, nie ma to wiele wspólnego z „optymalnym”.

s. 60: Opis metody JS – to już było – powtórzenie.

s. 61: Opis metody Object – to już było – powtórzenie.

s.62: Rys. 2.4.13 w opisie: „kolejnych warstw modeli” – wybranych, przykładowych, niekoniecznie kolejnych.

s.62: „dwukrotnie krócej od przeprowadzonego procesu FDM” – jeszcze nie było o nim mowy, dlatego za wcześnie na ten wniosek.

s.63: Ponownie dysza „zapewniająca większe ciśnienie”.

s. 66: Uzasadnienie poziomego ustawienia modelu jest niewystarczające, czas wykonania modelu nie powinien być w tym przypadku decydujący (brak badań własnych nad czasem wykonania w zależności od ustawienia przedmiotu, w końcu wypełnia się taką samą objętość modelu).

s. 67.: Powtórzenie opisu wydruku FDM (wytwarzana jest inna część, ale opis bardzo podobny).

s. 68: „...wszystkie podpory zostały rozpuszczone – modele płucze się” – niepoprawny szyk zdania.



- s. 69: „Można zatem wnioskować, iż tryb HS jest znacznie korzystniejszy od trybu HQ (pod względem czasu realizacji i zużycia materiałowego)” – „znacznie” nie jest najważniejszym określeniem, zwłaszcza że jakość modelu jest mało użyteczna.
- s. 70: Rys. 2.5.1 – dlaczego przy pomiarze modelu SLA i FDM nie stosowano uchwytu jak przy pomiarze JS?
- s. 78: Raport pomiarowy – tutaj właśnie widać negatywne skutki ustawienia modelu pod kątem 45°, a wcześniej wspomniano iż jest to ustawienie „optymalne”.
- s. 82: Uwagi ogólne odnośnie skanowania laserowego oraz tomografii komputerowej nie są poparte literaturą ani badaniami własnymi, skąd te wnioski? Odnośnie tomografii wcale nie są takie oczywiste.
- s. 82: Najpierw nakleja się markery a potem dokonuje pomiaru a nie odwrotnie.
- s. 84: Rys. 2.5.16 – „uzupełnianie brakujących powierzchni” – rys. nieczytelny (jak wiele innych), należałoby wspomnieć coś więcej o naprawie powierzchni.
- s. 88: „ o określonej dla siebie grubości – 0,1 mm” – sformułowanie niefortunne.
- s. 88: oznaczenie osi dużą literą „Z”, wcześniej oznaczano małą literą „z”.
- s. 89: Znow powtórzenie opisu technologii SLA.
- s. 90: Rys. 2.6.3 - to już było !
- s. 93: wykonanie modelu FDM – to już było!
- s. 95: Powołanie na rysunki po rysunkach.
- s. 96: „... wykorzystując odpowiednie dla danej powierzchni pędzle” – bez komentarza!
- s. 98: „... delikatnego polerowania papierem ściernym.” – raczej „obróbki ściernej z wykorzystaniem”.
- s. 101: Rys. 2.6.15 i Rys. 2.6.16 - „porównanie makrofotografii powierzchni” – powinno być porównanie powierzchni z użyciem makrofotografii.
- s. 102: „równoległe do warstw modelu oraz osiowo-prostopadle do warstw” – niezrozumiałe.
- s. 109: „Opracowano zatem technologię badań” – czy na pewno „technologię”?
- s. 110.: „Do badań użyto.... wykorzystaną.... zastosowaną...” – bardzo zagmatwane zdanie.
- s. 111: Tab. 2.7.1 to „okrojona” wersja tablicy, która pojawiła się już wcześniej.
- s. 111: Rozdz. 2.7.2. – pierwszy akapit napisano niezrozumiale, należało tu użyć wypunktowania, tak jest mało czytelne.
- s. 112: Brak rozwinięcia akronimu DSC.
- s. 112: Wnioski odnośnie wytrzymałości przy rozciąganiu statycznym zagmatwane.



- s. 113: Rys. 2.7.5 wykres nieczytelny (mały i dwa podobne odcienie czerwieni),
- s. 116; „Twardość wg Rocwella” – raczej Rockwella.
- s. 116: Dlaczego w Tab. 2.7.7 nie zamieszczono wartości średnich?
- s. 117: Dlaczego w Tab. 2.7.8 nie zamieszczono wartości średnich?
- s. 120: Brak rozwinięcia akronimu SEM.
- s. 122: Co ma piernik do wiatraka? Czyli co ma kucie lotniczych stopów Mg i Al do weryfikacji fizycznej modeli RP? „Dysponując modelami RP i szczegółową wiedzą w zakresie ich własności (powinno być właściwości) przeprowadzono badania modelowe mając na celu opracowanie i optymalizację procesów kształtowania plastycznego docelowych stopów metali” – nie widzę żadnego związku.
- s. 123: Właściwości, jakimi powinny charakteryzować się materiały elastooptyczne – należało podać literaturę.
- s. 127: Rys. 2.8.6 i 2.8.7 – stanowczo za małe.
- s. 135: „... w oparciu o przedstawione wyżej wyniki badań modelowych opracowano proces plastycznego kształtowania stopów Mg i Al. (warunek podobieństwa modelowego)” – nie ma związku z pracą, niczego takiego nie wykazano w badaniach.
- s. 135: „Siłę tą rozłożono na 682 węzłów” – dlaczego równomiernie? W ten sposób na granicy obciążenia wprowadzono karb obliczeniowy.
- s. 140: Pierwszy akapit – znów nie widzę żadnego związku RP z plastycznym kształtowaniem stopów.
- s. 142: „Stanowisko takie składa się głównie z siłownika” – niesamowita historia! 😊
- s. 146: Brakuje porównania obserwacji eksperymentu z elastooptyki z MES. Dlaczego nie pokazano analizy MES dla dźwigni?
- s. 147: „...trafia do lewej komory” – nieprecyzyjnie (nie wszyscy mają lewą rękę po tej samej stronie 😊).
- s. 151: Opis mikroskopu - zbędny, zwłaszcza że użyto tu wielu nieznanych akronimów bez wyjaśnienia – to chyba opis katalogowy urządzenia.
- s. 155: Mikrotardościomierz –zjedzona literka „w”.
- s. 158: Powtórzenie opisu skanowania optycznego.
- s. 161: „Uzyskano bardzo dobre wyniki pomiaru chropowatości” – co Autor miał na myśli?
- s. 162: Najpierw opisano pomiar chropowatości modelu DMLS a dopiero później sposób jego wytworzenia – zła kolejność.
- s. 164: brak rozwinięcia akronimów SLI, CLI.
- s. 165: Powołanie na rysunek po rysunku.

s. 168: Rys. 2.10.45 – bardzo ładne zdjęcia!

s. 171: Rozdział 3. Analiza wyników: „badania wykazały, że procesy plastycznego kształtowania stopów metalu, w tym kucie matrycowe, może być wspierane przez szybkie prototypowanie” – nie znalazłem w pracy niczego na ten temat, nie widzę związku. Wspomniano jedynie (czego mnie pokazano w badaniach), iż metodami RP można wykonywać matryce.

s. 171: Ciekawy wniosek odnośnie danych materiałowych deklarowanych przez producentów.

s. 173: Tab. 3.2 – trudno porównywać czasy wykonania różnych modeli różnymi technikami.

s. 176.: Uwaga odnośnie stanowiskowych badań zmęczeniowych kół zębatych – być może słuszna, jednakże nie wynika z badań Autora.

s. 183: Par. 12 :„Wyniki prowadzonych badań pozwoliły na opracowania i optymalizację procesu kucia lotniczego stopu Mg i Al.”... nie znalazłem żadnych badań w pracy na ten temat.

s. 183: Par. 14: „Techniki RP mogą wspierać opracowanie i dobór najkorzystniejszych parametrów procesu przeróbki plastycznej metali...” - stwierdzenie nieuprawnione.

W wykazie literatury znalazłem pozycje powiązane raczej w bardzo luźny sposób z pracą: 4, 6, 47, 51, 70, 74, 79, 88, 89, 104, 109, 114, 127, 161, 163.

Szkoda, że Autor nie pokusił się o przeprowadzenie badań elastooptycznych w świetle przechodzącym, ponieważ żywica SL5170 posiada właściwości żywicy czynnej optycznie.

Dlaczego przy pomiarze chropowatości posługuje się parametrem Ra, który zdecydowanie różni się w zależności od kierunku pomiaru na powierzchni a nie przykładowo parametrem St?

Nie wspomniano o ograniczeniach elastooptyki – głównie geometrycznych, np. koła zębate.

Drobne błędy interpunkcyjne i tzw. „literówki” (te uwagi przekazałem Autorowi osobiście).

Brak oznaczeń skrótów i akronimów (MES,...)

4. Podsumowanie

Autor opracował metodykę pozwalającą na przebadanie elementów w warunkach bardzo zbliżonych do rzeczywistych. Opracowanie jest bardzo kompleksowe i wyczerpujące.

Cenne są krytyczne uwagi doktoranta. Krytycznie odnosi się do pewnych zastosowań MES – w czym się z Nim zgadzam. Podobnie krytycznie odnosi się do danych materiałowych podawanych przez producentów materiałów, wykazując na ich „naciąganie”.

Przedstawione rezultaty badań są oryginalnymi wartościowymi osiągnięciami autora. Autor samodzielnie rozwiązał oryginalny problem naukowy, a mianowicie dowiódł przydatności metod RP w wytwarzaniu modeli i możliwości wykorzystania ich do wstępnych analiz konstrukcji elementów maszyn na zasadzie podobieństwa modelowego z wykorzystaniem elastooptyki.

Znakomita jest moim zdaniem przedstawiona charakterystyka błędów poszczególnych metod RP – nie w oparciu o literaturę lecz o konkretne, własne badania i doświadczenia. Doświadczenia Autora w zakresie wykonywania prototypów RP są mi znane, w opiniowanej pracy nie są przedstawione wszystkie Jego dokonania, a są ogromne.

Przedstawione uwagi krytyczne nie umniejszają wartości pracy. Doktorant zmierzył się z bardzo obszernym tematem. Recenzowana praca napisana jest w sposób dość jasny i przejrzysty (pomimo powtórzeń). Na uwagę zasługuje bogaty materiał ilustracyjny (choć mam zastrzeżenia do wielkości rysunków).

Na podstawie analizy przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że tematyka pracy została dokonana w sposób trafny, a jej zakres spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Formalny układ pracy jest prawidłowy.

Dysertacja odnosi się do aktualnej wiedzy i praktyki objętej jej zakresem (poza nielicznymi wyjątkami), a w wielu elementach wnosi nowe treści.

Zasadnicze cele pracy zostały w pełni osiągnięte w zakresie przyjętym przez Doktoranta. Prezentowane wyniki uzyskane zostały w poprawnie przeprowadzonym procesie badawczym.

Co warto podkreślić, praca ta nie wyczerpuje całkowicie zagadnienia a stanowi wstęp do dalszych badań.

Godnym podkreślenia jest użyteczny charakter pracy. Przedstawiona metodyka badań według przedstawionego algorytmu postępowania może być bezpośrednio implementowana w przemyśle i to nie tylko lotniczym.

Z pracy można jasno wywnioskować, iż Autor znakomicie czuje problematykę procesów RP i ma ogromne doświadczenie praktyczne w wykonywaniu prototypów.

Tematyka pracy mieści się w zakresie dyscypliny naukowej „Budowa i eksploatacja maszyn”.

5. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska nt. „Techniki szybkiego prototypowania w procesie projektowania i wdrażania do produkcji elementów konstrukcji lotniczych” spełnia wymagania Ustawy o Stopniach i Tytułach Naukowych oraz o Stopniach i Tytułach Naukowych w Zakresie Sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Jacka Bernaczka do publicznej obrony.

