

Nowy Sącz, 09.03.2015 r.

dr hab. inż. Mariusz Cygnar, prof. PWSZ
Instytut Techniczny
Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nowym Sączu
ul. Zamenhofa 1A
33-300 Nowy Sącz

OCENA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka Bernaczka

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

PODSTAWA OPRACOWANIA

Pismo Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej prof. dr hab. inż. Jarosława Sępa z dnia 13 lutego 2015 roku nr RM-530-10-02/2015, na podstawie decyzji Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa z dnia 11 lutego 2015 roku.

WPROWADZENIE

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Jacka Bernaczka dotyczy wykorzystania technik szybkiego prototypowania w procesie projektowania i wdrażania do produkcji elementów konstrukcji lotniczych. Podjęty temat należy do grupy problemów bardzo istotnych w aspekcie aplikacji innowacyjnych technologii w współczesnych przedsiębiorstwach, w tym sektora lotniczego. Podyktowane jest to koniecznością optymalizacji procesów produkcyjnych i ograniczenia kosztów, w szczególności podczas wstępnej fazy opracowania dokumentacji technicznej nowego wyrobu oraz badań prototypu.

Przemysł lotniczy wciąż poszukuje nowych rozwiązań technologicznych i materiałowych celem podniesienia właściwości wytrzymałościowych konstrukcji przy jednoczesnym ograniczeniu masy poszczególnych elementów. Rygorystyczne normy jakościowe i bezpieczeństwa dla różnego typu części do samolotów wymuszają na producentach poszukiwanie nowatorskich technologii mających na celu przyspieszenie i optymalizację procesu projektowania i wdrażania do seryjnej produkcji. Wsparciem dla tego typu działań może być szybkie prototypowanie nowych części i badania realizowane na

modelach RP. Techniki szybkiego prototypowania wykorzystywane w procesie produkcyjnym mogą również korzystnie wpływać na ograniczanie kosztów produkcji, co ma istotny wpływ na podniesienie konkurencyjności i dynamikę rozwoju danej firmy.

Działające w ramach Doliny Lotniczej przedsiębiorstwa z regionu Podkarpacia wdrażają do procesów produkcyjnych nowe technologie opracowane przez ośrodki naukowe, między innymi Politechnikę Rzeszowską. Baza laboratoryjna wyposażona w nowoczesną aparaturę RP i materiały modelowe oraz wysoko wykwalifikowana kadra naukowa z dużym doświadczeniem w obszarze metod szybkiego prototypowania, zapewnia możliwość realizacji szeroko zakrojonych badań na rzecz lotnictwa. Z tego względu celowe jest prowadzenie przez Doktoranta prac badawczych w zakresie wykorzystania technik szybkiego prototypowania w procesie projektowania i wdrażania do produkcji elementów konstrukcji z możliwością praktycznej implementacji poszczególnych wyników badań do produkcji części i elementów w przemyśle lotniczym.

UKŁAD PRACY DOKTORSKIEJ

Rozprawa doktorska mgr inż. Jacka Bernaczka pt. „Techniki szybkiego prototypowania w procesie projektowania i wdrażania do produkcji elementów konstrukcji lotniczych” ujmuje kompleksowo zagadnienia z zakresu metod RP, stosowanych materiałów modelowych oraz badań z wykorzystaniem prototypów wytworzonych poszczególnymi technikami.

Praca składa się ze 195 stron i podzielona jest na 4 rozdziały zasadnicze oraz 21 podrozdziałów, z których 9 posiada łącznie 35 wyodrębnionych podrozdziałów tematycznych. Ponadto pracę poprzedza spis treści, wstęp i wykaz oznaczeń, a kończy alfabetyczne zestawienie literatury i streszczenie w języku polskim i angielskim.

Bibliografia obejmuje 165 pozycji ze źródeł krajowych i zagranicznych w tym także opracowania współautorskie doktoranta w liczbie 19, które są ściśle związane z tematyką rozprawy. Zdecydowana większość cytowań stanowią opracowania aktualne.

Rozdział pierwszy zawiera analizę stanu zagadnienia i przedstawia ogólną tematykę związaną z szybkim prototypowaniem. Autor przeprowadził klasyfikację bibliografii i dokonał podziału na 5 obszarów tematycznych, z których wybrał poszczególne pozycje cytowane w dalszej części pracy. Rozdział otwiera prezentacja metod szybkiego prototypowania w aspekcie zastosowań przemysłowych. Następnie Autor podejmuje zagadnienia związane m.in. z klasyfikacją technik RP, charakterystyką formatów zapisu

danych dla szybkiego prototypowania, dokładnością wykonania prototypów, szczegółową analizą wybranych metod RP, procesem opracowania danych STL. Oprócz przedstawionej powyżej problematyki, Doktorant prezentuje doświadczalną metodę badania konstrukcji – elastooptykę. Podrozdział zawiera opis podstawowych metod analizy rozkładu naprężeń z wykorzystaniem elastooptyki z uwzględnieniem schematów obrazujących zasadę działania i zależności matematyczne, z których wynika warunek podobieństwa modelowego. Rozdział pierwszy przedstawia także studium przypadku zastosowania technik szybkiego prototypowania – plastyczne kształtowanie wybranych elementów konstrukcji lotniczych ze stopów magnezu. Teoretyczną część pracy kończy konstruktywna analiza stanu zagadnienia, z której wynikają cele i zakres rozprawy doktorskiej.

Rozdział drugi stanowi zasadniczą część pracy i zawiera badania własne. Na wstępie Autor przedstawia program, materiał i metodykę badań. Program w formie schematu w przejrzysty sposób określa rodzaj i kolejność przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej badań własnych. Wykorzystane w procesie badawczym materiały modelowe zaprezentowane są w postaci tabel z podstawowymi danymi technicznymi deklarowanymi przez poszczególnych producentów. W tej części Doktorant wyszczególnił również aparaturę zastosowaną do wytworzenia modeli RP i przeprowadzenia późniejszych badań. Kolejne dwa podrozdziały (2.3 i 2.4) zawierają szczegółową charakterystykę procesów wytwarzania modeli piasty koła samolotu, piasty śmigła samolotu UAV i dźwigni układu sterowania śmigłowca. Części zostały wybrane do procesu badań i wytworzone z wykorzystaniem techniki SLA, JS i FDM. Autor przedstawia procedurę przygotowania danych numerycznych dla poszczególnych procesów RP, przygotowanie aparatury oraz przeprowadzenie procesu i tzw. postprocesu – obróbki końcowej modeli RP. W dalszej części tj. w dwóch kolejnych podrozdziałach, Doktorant przeprowadza analizę dokładności wymiarowej technik RP oraz analizę powierzchni modeli. Pomiar dokładności odwzorowania kształtu modeli piasty koła samolotu i dźwigni układu sterowania śmigłowca (podrozdział 2.5) przeprowadzono z wykorzystaniem współrzędnościowych maszyn pomiarowych – aparatury Wenzel (pomiar dotykowy) i optycznego skanera Atos. Wyniki dla piasty koła samolotu zostały przedstawione w formie raportów pomiarowych, a wyznaczona wartość średnia dokładności wymiarowej technik SLA, FDM i JS umieszczona została w tabeli. Wyniki pomiaru optycznego dźwigni układu sterowania śmigłowca wykonanej w dwóch trybach pracy aparatury Objet (technika JS) – wysokiej jakości i prędkości – zostały przedstawione w formie wybranych okien oprogramowania pomiarowego (dla poszczególnych powierzchni dźwigni) z wyraźnie

wyeksponowaną skalą pomiarową. Analiza powierzchni modeli RP piasty koła samolotu (podrozdział 2.6) została przeprowadzona w aspekcie charakterystycznych dla każdej z metod (SLA, FDM, JS) błędów związanych z technologią wytwarzania oraz ustawieniem w obszarze roboczym aparatury. Autor wskazał obszary charakterystyczne i przyczyny powstawania błędów oraz sposoby ich uniknięcia bądź zmniejszenia rozmiarów. Dokonano charakterystyki obróbki wykańczającej powierzchni modeli biorąc pod uwagę wyniki otrzymane w rozdziale wcześniejszym – rodzaj i rozmiar błędu odwzorowania kształtu w procesie RP. Następnie Autor przeprowadził pomiar chropowatości powierzchni w obszarach charakterystycznych modeli piasty koła samolotu. Wyniki przedstawiono w postaci raportów pomiarowych z urządzenia Homwell oraz wyznaczono wartość średnią parametru R_a w tabeli. Podrozdział 2.7 przedstawia badania właściwości materiałów modelowych wykorzystanych w procesach SLA i JS. Są to najczęściej stosowane obecnie fotopolimery (żywice optycznie czynne), których dane materiałowe niezbędne są w procesie badań modeli RP. Autor wykonał standardowe modele testowe (kształtki) i poddał je badaniom. Przeprowadzono badania wytrzymałości przy statycznym rozciąganiu, twardości, udarności, odporności cieplnej, temperatury zeszklenia oraz morfologię SEM. Otrzymane i opracowane przez Doktoranta wyniki badań materiałów modelowych RP wykazały znaczne rozbieżności względem danych deklarowanych przez producentów poszczególnych żywic – wyraźny spadek wartości podstawowych parametrów wytrzymałościowych. Kolejny podrozdział badań (2.8) zawiera wyniki badań modelowych przeprowadzonych w oparciu o prototypy JS piasty koła samolotu i dźwigni układu sterowania śmigłowca. Autor opracował technologię wytworzenia powłok optycznie czynnych na powierzchniach modeli JS i przeprowadził analizę rozkładu naprężeń metodą elastooptyki – z wykorzystaniem światła odbitego. Badane elementy konstrukcji lotniczych zostały umieszczone na specjalnie wykonanych stanowiskach i obciążone w odpowiednich układach sił. Wyniki badań wytrzymałościowych żywicy FC720 wyznaczone we wcześniejszym rozdziale posłużyły do obliczenia wartości sił obciążających badane części. Dodatkowo Doktorant przeprowadził analizę numeryczną MES dla podstawowego przypadku obciążenia piasty koła samolotu ciśnieniem w oponie. Wyniki badań własnych stanowiły wsparcie do opracowania w Politechnice Lubelskiej procesu plastycznego kształtowania stopów magnezu i aluminium dla piasty koła samolotu i dźwigni układu sterowania śmigłowca, o czym Autor wspomina w podrozdziale 2.9. Doktorant zaopatrzył odkuwki Mg i Al dźwigni układu sterowania śmigłowca w powłoki elastooptyczne i przeprowadził analizę rozkładu naprężeń wykorzystując podobieństwo modelowe pomiędzy

prototypem JS, a odkuwką ze stopu metalu. Ostatni podrozdział badań własnych (2.10) zawiera szczegółową charakterystykę metody spieku proszku ze stopu tytanu – DMLS. Doktorant wykonał standardowe modele testowe i przeprowadził próbę spęczenia i rozciągania. Równolegle przeprowadził badania dla próbek klasycznie kształtowanych – blachy i pręta. Wyniki zostały zamieszczone w formie wykresów i tabel. Autor przeprowadził dodatkowo obserwację mikrostruktury, pomiar twardości, analizę dokładności wymiarowej oraz pomiar chropowatości powierzchni modeli DMLS. Podrozdział 2.10 zakończony jest opracowaniem danych numerycznych oraz przygotowaniem i przeprowadzeniem procesu DMLS dla modeli walcowych kół zębatych do planetarnej przekładni lotniczej.

Trzeci rozdział pracy zawiera szczegółową analizę otrzymanych wyników badań. Autor dokonał gruntownego podsumowania przeprowadzonych w ramach pracy doktorskiej badań własnych, a najistotniejsze wyniki przedstawił w postaci tabel i wykresów oraz opatrzył stosownym komentarzem. Rozprawa doktorska zostaje podsumowana w rozdziale czwartym – Autor zamieszcza w nim wnioski końcowe, opracowane w oparciu o przeprowadzoną obszerną analizę wyników badań własnych.

OCENA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tematykę pracy podjęto w oparciu o przeprowadzoną inwentaryzację zapotrzebowania przedsiębiorstw regionu Podkarpacia, m.in. sektora lotniczego, na zastosowanie nowoczesnych technologii w procesie produkcji celem poprawy konkurencyjności, ograniczenia kosztów oraz przyspieszenia i optymalizacji procesu wdrożeń przemysłowych.

Autor opracował program badań własnych pod kątem wyznaczenia ścisłych kryteriów doboru techniki szybkiego prototypowania do konkretnych zastosowań przemysłowych – dla danego wyrobu. Analizie zostały poddane metody powszechnie wykorzystywane, co jest bardzo istotnym czynnikiem decydującym o zainwestowaniu przedsiębiorstwa w obszar danej metody RP (zakup maszyn, dobór materiałów, przygotowanie zaplecza badawczego). Doktorant przeprowadził szczegółową analizę poszczególnych technik RP w aspekcie aplikacji szybkiego prototypowania we wczesnym etapie wdrożenia przemysłowego – projektowania, weryfikacji i badań prototypu. Autor dokonał charakterystyki metod, przedstawił istotę wytwarzania modelu w poszczególnych procesach, poddał ocenie dokładność wymiarową i jakość powierzchni prototypów oraz przeprowadził badania materiałów modelowych. Pozyskana w procesie badań własnych wiedza stanowi znaczny

wkład w ogólną teorię szybkiego prototypowania części maszyn i może zostać wykorzystana w przemyśle jako czynnik decydujący o wyborze danej techniki.

Autor w prowadzonych badaniach wskazał znacznie szersze spektrum wykorzystania technik szybkiego prototypowania, traktowanych w większości przypadków jako narzędzie do fizycznej weryfikacji nowego wyrobu. Opracowana przez Doktoranta technologia wytwarzania powłok optycznie czynnych na powierzchniach modeli JS umożliwia przeprowadzenie badań modelowych. Elastooptyczna analiza rozkładu naprężeń w modelach JS dokonana wg ściśle określonych warunków obciążenia (bazujących o pozyskane wyniki badań materiałów modelowych) pozwala na wybór i opracowanie docelowego procesu produkcyjnego dla danej części.

Szczegółowa charakterystyka i szeroko zakrojone w pracy badania w obszarze metody DMLS – spieku proszku ze stopu tytanu - uzupełniły w znacznym stopniu wiedzę na temat wytwarzania modeli użytkowych. Autor wskazał zalety i ograniczenia w stosowaniu technik w procesie produkcyjnym. Na podstawie wykonanych modeli i przeprowadzonych w oparciu o nie badań, Autor wyznaczył podstawowe właściwości proszku ze stopu tytanu spiekanego w procesie DMLS.

Realizacja niniejszej rozprawy skutkuje uzyskaniem bogatego materiału badawczego w obszarze szybkiego prototypowania, zarówno w aspekcie teoretycznym jak i użytkowym. Wyniki przeprowadzonych badań uzupełniają dotychczasową wiedzę oraz mogą być wykorzystane w przemyśle, m.in. w procesie projektowania i wdrażania do produkcji elementów konstrukcji lotniczych.

Należy zaznaczyć, że rozpatrywana tematyka jest bardzo istotna w zakresie optymalizacji procesów produkcyjnych mających na celu skrócenie czasu wdrożenia do produkcji nowych elementów, poprawy ich jakości i jednoczesnego ograniczenia kosztów.

UWAGI SZCZEGÓŁOWE

Poddając analizie rozprawę doktorską zauważa się, że jej struktura i układ składa się z dwóch zasadniczych części: teoretycznej i badawczej. W wyodrębnionej części teoretycznej – rozdział 1 „Analiza stanu zagadnienia”, Doktorant zamieścił klasyczny przegląd literatury uzupełniony o rozważania własne. Bibliografia została sklasyfikowana tematycznie – Autor dokonał podziału na pięć grup zamieszczając w nich poszczególne pozycje, a powołania w tekście rozprawy na wybrane źródła zostały przeprowadzone w sposób prawidłowy.

W podrozdziale 1.3. „Klasyfikacja technik RP” Doktorant zamieścił rysunki 1.3.1 i 1.3.2 bezpośrednio przeniesione z cytowanej pozycji literaturowej. Ze względu na dynamiczny rozwój szybkiego prototypowania i nowe rozwiązania aparaturowe i materiałowe należałoby uzupełnić schematy klasyfikujące techniki RP.

Podrozdział 1.7. „Opracowanie modelu STL” opatrzony został m.in. rysunkami 1.7.2 i 1.7.3, które dotyczą piasty koła samolotu poddawanej analizom w drugiej części pracy – „Badania własne”. Stosownym byłoby zatem zamieszczenie w/w rysunków w podrozdziale 2.3. zatytułowanym: „Realizacja procesów RP dla modelu piasty koła samolotu”, w części poświęconej opracowaniu danych numerycznych CAD/STL/RP dla poszczególnych procesów.

Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku rysunku 1.8.2 a), na którym Autor prezentuje stanowisko badawcze z kołem samolotu – rysunek powinien znajdować się w podrozdziale 2.8. „Badania modelowe – analiza rozkładu naprężeń w modelach RP elementów konstrukcji lotniczych”.

Bardzo obszernie potraktowana przez Autora teoretyczna część poświęcona doświadczalnej metodzie elastoptyki – podrozdział 1.8. „Elastoptyka” powinna zawierać jedynie syntetyczną informację dotyczącą metody – podstawy umożliwiające zrozumienie zjawiska oraz charakterystykę metody światła odbitego, która wykorzystywana jest w części badawczej pracy.

Druga część rozprawy, poświęcona badaniom własnym, to praca o charakterze badawczym. Doktorant szczegółowo analizuje proces opracowania i przeprowadzenia szybkiego prototypowania wybranymi metodami dla piasty koła samolotu – podrozdział 2.3 oraz piasty śmigła samolotu UAV i dźwigni sterowania śmigłowca – podrozdział 2.4. Procesy zostały przygotowane i przeprowadzone w sposób analogiczny, można było zatem ograniczyć się do prezentacji dla wybranej części, a wspomnieć jedynie o pozostałych – wytworzonych tożsamo.

Wyniki pomiarów dokładności wymiarowej poszczególnych metod przeprowadzonych z wykorzystaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej – dotykowej maszyny Wenzel – zostały przedstawione przez Autora w formie raportów pomiarowych – Rys. 2.5.2 – 2.5.12. Odczyt wartości w poszczególnych punktach pomiarowych powinien być bardziej czytelny. Można było przedstawić jedynie wybrane (reprezentatywne) punkty pomiarowe, a pozostałe wykorzystać tylko do wyznaczenia średniej dokładności dla poszczególnych metod.

Podrozdział 2.6. „Analiza powierzchni modeli RP piasty koła samolotu” zawiera m.in. wyniki pomiarów chropowatości powierzchni modeli RP piasty koła samolotu przedstawione w formie raportów pomiarowych. Na rysunku 2.6.23 przedstawiono wyniki pomiaru chropowatości powierzchni modelu FDM przeprowadzonego w kierunku osiowym – prostopadle do warstw modelu. Wyznaczona wartość parametru R_a wynosi $10,2 \mu\text{m}$. Należało zatem powtórzyć pomiar zwiększając długość odcinka pomiarowego i zamieścić w pracy właściwy raport pomiarowy.

Kolejnym błędem analizowanej części pracy jest częste sformułowanie „schodek” dla określenia błędu charakterystycznego przy realizacji procesów przyrostowych opartych na budowie modelu warstwa po warstwie. Słowo „schodek” jest określeniem nieprawidłowym, nie powinno mieć zastosowania w tego typu analizach.

Podrozdział 2.7. „Badanie właściwości materiałów modelowych” zawiera szczegółową analizę właściwości materiałowych fotopolimerów SL5170 dla techniki SLA i FC720 – dla JS. Celowym było by uzupełnienie tej części pracy o badania materiału ABSPlus P430 wykorzystanego do wytworzenia prototypów FDM piasty koła samolotu, piasty śmigła samolotu UAV i dźwigni układu sterowania śmigłowca.

Ostatni podrozdział części badawczej – 2.10. „Metoda DMLS spieku proszku ze stopu tytanu” przedstawia przeprowadzone przez Doktoranta badania w obszarze nowej technologii opracowanej przez firmę EOS. Wyniki dotyczą m.in. analizy SEM powierzchni modeli DMLS – Rys. 2.10.13 – 2.10.19. Rysunki powinny zostać powiększone do rozmiaru umożliwiającego wyraźną obserwację różnic w mikrostrukturze poszczególnych próbek.

Poza przedstawionymi powyżej uwagami o charakterze merytorycznym, w pracy zauważalne są błędy edytorskie i interpunkcyjne. W pracy występują również niewielkie błędy redakcyjne m.in. o charakterze pomyłek literowych. Szczegółowy wykaz błędów edytorskich, redakcyjnych i interpunkcyjnych przekazałem Doktorantowi.

PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Autor w dysertacji podjął się bardzo trudnego i ambitnego zadania, które z oczywistych względów nie wyczerpuje całości zagadnień związanych z aplikacją technik RP do procesów przemysłowych. Pomimo wymienionych uwag mających głównie charakter dyskusyjny bardzo wysoko oceniam rozprawę doktorską Pana mgr inż. Jacka Bernaczka, a zawarte w pracy treści merytoryczne mają dużą wartość naukową i aplikacyjną. Zaprezentowana

metodyka badań, uzyskane wyniki i opracowane wnioski stanowią oryginalny wkład Doktoranta w dyscyplinę naukową "Budowa i eksploatacja maszyn", w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

Powyższe stwierdzenia świadczą o dużej wiedzy Doktoranta w prezentowanej dyscyplinie i właściwym przygotowaniu do samodzielnego prowadzenia i rozwiązywania złożonych problemów naukowych.

Uważam, że praca doktorska mgr inż. Jacka Bernaczka pt.:

"Techniki szybkiego prototypowania w procesie projektowania i wdrażania do produkcji elementów konstrukcji lotniczych",

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.

Mając na uwadze powyższe wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr inż. Jacka Bernaczka do publicznej obrony, która stanowi podstawę do nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

