

Poznań, 23.11.2016

prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski
Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych
Instytut Technologii Mechanicznej
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-965 Poznań
tel: +48 61 6653570
e-mail: michal.wieczorowski@put.poznan.pl

**Ocena rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Łukasza Przeszłowskiego**

Analiza i dobór parametrów szybkiego prototypowania kół zębatych metodą selektywnego spiekania proszków metali

Podstawa recenzji

Pismo Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej numer RM-530-7-02-2016 z dnia 9 listopada 2016.

1. Wprowadzenie

Zaprezentowana do oceny rozprawa doktorska jest związana z wytwarzaniem przyrostowym i badaniem kół zębatych. Tendencje światowe wskazują, że pomimo zastępowania przekładni zębatych w niektórych dziedzinach przemysłu innymi sposobami przekazywania napędu, w dalszym ciągu są gałęzie, w których różne rodzaje uzębień są nieodzowne. Przykładowo na rynku produkcji kół zębatych dla przemysłu samochodowego odnotowywany jest stały wzrost wolumenu produkcji. Z kolei specyfika pojazdów i normy związane z ochroną środowiska wymuszają redukcję ciężaru przekładni zębatych, zwiększenie niezawodności i projektowanie konstrukcji kompaktowych. Efektami takich działań są: wysoka dokładność wykonania kół zębatych, wzrost efektywności produkcji przekładni ręcznych i automatycznych oraz

zmniejszenie rozmiarów kół zębatach przy niezmienionej wytrzymałości. To wszystko powoduje również konieczność poszukiwania nowych metod wytwarzania i pomiaru kół zębatach, z jednej strony zapewniających pokazane powyżej wymagania, a z drugiej bardziej związanych z ich funkcjonalnością. Oprócz obróbki skrawaniem proponuje się zatem powrót do obróbki plastycznej oraz zastosowanie wytwarzania przyrostowego, które z pewnością ma szansę zastąpić bardziej tradycyjne formy tworzenia wyrobów. Stały rozwój różnych technik należących do tej grupy metod produkcji obserwowanych przez ostatnie kilkanaście lat oraz szybko rosnące zainteresowanie przemysłu świadczy o jej rzeczywistych i potencjalnych możliwościach. Dotyczy to również zagadnień poruszanych w rozprawie przez Doktoranta, czyli analizy i doboru parametrów szybkiego prototypowania kół zębatach metodą selektywnego spiekania proszków metali DMLS – Direct Metal Laser Sintering na wybranych etapach procesu wytwarzania. Podjęta przez Doktoranta tematyka jest zatem jak najbardziej aktualna, a sama praca doskonale przy tym wpisuje się w całokształt prac od szeregu lat prowadzonych na ten temat w Politechnice Rzeszowskiej. W świetle przedstawionych zagadnień oraz po uwzględnieniu doświadczeń Autora podjęcie tematu rozprawy należy uznać za trafne i w pełni uzasadnione, zarówno pod względem naukowym, jak i utylitarnym.

2. Omówienie rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca składa się z 8 rozdziałów i zawiera 148 stron. Napisana została z minimalnym odstępem pomiędzy wierszami, przez co zawiera bardzo dużo treści. Kolejność rozdziałów i podrozdziałów tworzy układ spójny i logiczny. Zawartość merytoryczna jest bogato ilustrowana, co stanowi wartość samą w sobie i pomaga w interpretacji toku rozumowania Autora.

Rozdział pierwszy dotyczy rozwoju aplikacji technologii przyrostowych i stanowi wprowadzenie do zagadnienia szybkiego prototypowania, jako zbioru technologii szeroko stosowanych w inżynierii produkcji w różnych obszarach przemysłu w ujęciu do światowego rynku technik przyrostowych. Jak wynika z treści rozdziału technologie przyrostowe z roku na rok znajdują coraz więcej zastosowań w wielu gałęziach przemysłu.

W rozdziale drugim Autor przeprowadził analizę stanu zagadnienia aplikacji technologii addytywnych do wytwarzania elementów maszyn, ze szczególnym uwzględnieniem kół zębatach. Jak wynika z analizy istnieje dość duże zainteresowanie technologiami przyrostowymi w obszarze badawczym i przemysłowym, szczególnie pozwalającymi wytwarzać wyroby przez spiekanie warstwowe proszków metali. Jednocześnie informacje o charakterze aplikacyjnym

dotyczące tych technologii z zakresu inżynierii produkcji są trudno dostępne i rzadko publikowane. Biorąc to pod uwagę celowe jest podjęcie tematu badawczego zawartego w rozprawie. Tutaj została również sformułowana teza pracy oraz jej cel i zakres.

Rozdział trzeci obejmuje wykonanie modeli badawczych kół zębatach i stanowi zasadniczą część pracy dotyczącą całego procesu wytwarzania, wynikiem czego została opracowana autorska metodyka wytwarzania kół zębatach metodą hybrydową (przyrostową i ubytkową), co stanowi wkład własny Autora w rozwój dyscypliny inżynieria produkcji. Omówiono w nim m.in. rodzaje obróbki w procesach technologicznych, projektowanie procesu technologicznego, plan produkcyjny i nowe wzorce procesów produkcyjnych. Zaprezentowano proces technologiczny części typu koło zębata oraz półfabrykat wytworzony w procesie przyrostowym.

W rozdziale czwartym poświęconym metodyce badań własnych przedstawione są wyniki badań i analiza wyników pomiarów geometrycznych oraz badań materiałowych, które miały za zadanie potwierdzenie założeń określonych w tezie pracy. Omówiono modele badawcze, analizę dokładności struktury geometrycznej powierzchni uzębienia i cech geometrycznych otrzymanych modeli oraz badania metalograficzne i wytrzymałościowe. Autor dokonał w nim analizy wybranych parametrów, które chciał uzyskać jako konstruktor i technolog stosując określone procesy. Zweryfikował założenia na podstawie analizy wymiarowo kształtowej wytworzonych kół badawczych. Do tego użył dwóch metod pomiarowych opartych na systemie skanującym i na współrzędnościowej maszynie pomiarowej dedykowanej do pomiaru kół zębatach. Analiza właściwości próbek materiału uzyskanego w wyniku przyrostowego spiekania proszku w procesie DMLS pokazuje, że stal GP1 jest to pełnowartościowy materiał konstrukcyjny możliwy do zastosowania na odpowiedzialne wysoko obciążone elementy maszyn, jakimi są koła zębata. W przypadku procesu DMLS zauważalny jest brak typowych wad związanych z większością warstwowych procesów przyrostowych, które powodują zmniejszenie wytrzymałości prototypów w porównaniu do wyrobów wykonanych z tego samego materiału o jednolitej strukturze np. przez obróbkę ubytkową.

Rozdział piąty dotyczy analizy kosztów i czasu wytwarzania modeli badawczych z zastosowaniem procesu hybrydowego w ujęciu opartym na typowych założeniach stosowanych w inżynierii produkcji. Zaprezentowano w nim koszty własne wyrobu, obliczanie składników kosztów i analizę czasów obróbki wykańczającej. Rozdział ten jest szczegółowym odniesieniem do obszaru inżynierii produkcji w tym zakresie dla szybkiego prototypowania wyrobów. Autor zastosował tu klasyczne narzędzia do analizy kosztów i czasu wytwarzania, co jest interesujące chociażby z tego powodu, że na dzień dzisiejszy brak tego typu schematów dotyczą-

cych metod przyrostowych. Zaprezentowana adaptacja jest naturalnie obciążona pewnymi błędami, jednak pokazuje w sposób dość czytelny w zestawieniach tabelarycznych wartości kosztów i czasów wytwarzania modeli badawczych, jakimi są koła zębate. Dla porównania przeprowadzono analizę obróbki wykończeniowej koła zębatego z zastosowaniem obrabiarki sterowanej numerycznie. Z przeprowadzonych porównań wynika, że czas tej obróbki (z wykorzystaniem pręta jako półfabrykatu) jest ponad pięciokrotnie dłuższy niż dla obróbki z półfabrykatu wykonanego w metodzie DMLS. Jednakże czas wytworzenia samego półfabrykatu metodą DMLS jest znacznie dłuższy, szczególnie dla pojedynczego elementu. Natomiast koszty wytwarzania półfabrykatów metodą DMLS są blisko dziesięciokrotnie większe niż w konwencjonalnych procesach wytwórczych. Dane te są bardzo ciekawe z punktu widzenia wdrażania tego typu technologii, a co najważniejsze zostały opracowane w sposób wiarygodny.

W rozdziale szóstym zawarte jest podsumowanie wyników badań i wnioski końcowe z przeprowadzonych działań badawczych.

Rozdział siódmy to literatura, obejmująca 163 pozycje w tym 157 publikacji do których należą publikacje zwarte, artykuły w czasopismach i materiały konferencyjne. Publikacje te stanowią szeroki i aktualny przegląd związany z tematyką pracy, gdzie można również zauważyć współautorskie opracowania Autora rozprawy.

Ostatni odrębny numerowany rozdział to załączniki obejmujące dane materiałowe stosowanego przez Doktoranta proszku stalowego GP1, a także streszczenie w języku polskim i angielskim. Rozprawa zawiera również wykaz ważniejszych skrótów.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Zaprezentowana praca doktorska jest interesująca i zawiera dużo informacji cennych z punktu widzenia analizy wytwarzania przyrostowego. Treść przedstawiona przez Doktoranta pozwala pozytywnie ocenić jego wiedzę i doświadczenie, poparte wieloma godzinami pomiarów i analiz. Analizując założenia rozprawy doktorskiej stwierdzam, że postawiona przez Doktoranta teza pracy została udowodniona, chociaż dowód ten jest rozproszony w kilku rozdziałach. Moim zdaniem osiągnięto również główny cel pracy, który powinien być raczej przedstawiony w postaci zwartej zilustrowanej stosownym schematem i zaleceniami technologicznymi wynikającymi z opracowanej metodyki.

Doktorant poddał analizie kolejne etapy wytwarzania opracowując przy tym autorską metodykę hybrydowego procesu wytwórczego pozwalającego na wykonanie kół zębatych o wyższej dokładności wymiarowo – kształtowej niż można uzyskać z zastosowaniem wyłącznie

metod przyrostowych. Dotychczasowe opracowania ujmują generalnie wytwarzanie kół zębatych odrębnie w procesach ubytkowych i czasami w procesach przyrostowych. Biorąc to pod uwagę analiza łączna ujęta jako proces hybrydowy stanowi nową jakość zagadnienia i dzięki temu możliwe jest opracowanie innowacyjnych wyrobów np. kół zębatych z odciążoną piastą do napędów lotniczych wykonanych wyłącznie z zastosowaniem półfabrykatu powstałego w procesie przyrostowym. Zawarta w rozdziale trzecim szczegółowa analiza procesu przyrostowego DMLS definiuje uzyskany wyrób jako półfabrykat przeznaczony do dalszej obróbki. Stanowi to nowe podejście do technologii przyrostowej, gdzie dotychczas technologie te były rozpatrywane w kontekście wytwarzania gotowych modeli czy prototypów, a dodatkowa obróbka traktowana była jako rozszerzony tzw. post-processing. W związku z tym są to zagadnienia trudne do zdefiniowania w układzie technologii tradycyjnych i również w układzie technologii addytywnych.

Autor podjął próbę transferu wyników badań do praktyki produkcyjnej, w pracy w zasadzie nie jest to zbyt jasno przedstawione, jednak można znaleźć stwierdzenie, że część wyników badań została zgłoszona do ochrony patentowej i skomercjalizowana w postaci sprzedaży licencji technologii pn. „Sposób wytwarzania wielkogabarytowych elementów o wysokiej dokładności kształtowo-wymiarowej”. Takie podejście do zadań badawczych jest niezwykle istotne w zakresie rozwoju naukowego i gospodarki opartej na wiedzy.

Wszystkie wymienione powyżej aspekty niewątpliwie potwierdzają możliwości i umiejętności Doktoranta do prowadzenia badań naukowych i formułowania właściwych wniosków z nich płynących. Poniżej przedstawiam bardziej szczegółowe uwagi, przy czym pragnę zaznaczyć, że część z nich to moje komentarze.

Na rysunku 1.1. na stronie 6 autor przedstawia główne obszary zastosowań technik przyrostowych. W wyjaśniającym tekście podaje trzy najważniejsze jako produkcja elementów funkcjonalnych, dopasowanie i montaż oraz wytwarzanie narzędzi. Tymczasem z rysunku wynika, że powinny być tu pomoce wizualne. Jak można to skomentować?

Na stronie 20 definiując składowe procesu technologicznego Autor pisze, że *operacja* czy też *zabieg składają się na ciąg czynności, które należy wykonać*. Takie trochę nieszczęśliwe sformułowanie sugeruje, że operacja jest częścią czynności, a nie odwrotnie.

Początek rozdziału związanego z wykonaniem modeli badawczych (podrozdziały 3.1 – 3.5) zawiera bardzo podstawowe informacje. Moim zdaniem, tą część rozprawy można było pominąć. Podjąłbym również dyskusję z Autorem czy nie lepiej napisać przedmiot lub element badawczy zamiast używania słowa model, które domyślnie kojarzy się bardziej z systemem opisującym jakiś aspekt rzeczywistości, często w sposób przybliżony.

Pisząc o rodzajach obróbki Autor czasem pisze o obróbce wykończeniowej a czasem o wykańczającej. Warto to ujednoczyć. W tym samym akapicie szczególnie podoba mi się stwierdzenie, że dokładność odwzorowania klasuje się między 5 a 11, lepiej napisać o klasie dokładności. Dalej Autor podaje, że dla obróbki ultraprecyzyjnej dokładności sięgają 1 nm. Warto mieć świadomość, że w metrologii dokładność jest jedynie pojęciem jakościowym, a nie ilościowym (słownik VIM), stąd nie można podać jej wartości (bo nie wiemy co ona oznacza w sensie matematycznym), ani jej sprawdzić.

Na stronie 28 autor wymienia etapy procesu wytwarzania, zaczynając od opracowania modelu CAD i obróbki danych. Czy te czynności na pewno należą do prac związanych z wytwarzaniem i jego technikami?

Na stronie 29 i 30 Autor opisuje koło zębate w postaci shell. Warto rozwinąć ten termin w tej części pracy, pewne wyjaśnienie można znaleźć w części późniejszej, na stronie 39.

Nie za bardzo zrozumiałem ideę rysunku 3.14 ze strony 38 – nie wiem co przyjęto jako pomysł na piktogramy lub rysunki oraz dlaczego cały schemat narysowano w kierunku odwrotnym do ruchu wskazówek zegara.

Odnosząc się do opisu pomiarów nierówności powierzchni (strona 43 i 44), powinno się używać terminu *końcówka pomiarowa*, a nie *igła pomiarowa*, oraz *krzywa udziału materiałowego* a nie *krzywa nośności*. Zastanowiła mnie również bardzo duża prędkość przesuwu końcówki – 2 mm/s, podczas gdy z reguły stosujemy od 0,15 mm/s do 0,5 mm/s. Czy dane pomiarowe uzyskane w ten sposób dobrze odzwierciedlają rzeczywiste nierówności? Dyskutowałbym również ze stwierdzeniem, że głównym zadaniem *metrologii warstwy wierzchniej* nazywanej częściej metrologią nierówności powierzchni jest *wybór odpowiednich parametrów warunkujących jakość powierzchni*. To raczej moim zdaniem zadanie dla konstruktora, który istniejącymi parametrami powinien opisać funkcjonalne uwarunkowania powierzchni.

Opisując pomiary cech geometrycznych kół zębatach (strona 51) za pomocą mapy kolorowych odchyłek warto zaznaczyć od czego są to odchyłki. Jeśli dalej podaje się odchyłki dokładności wykonania to dobrze byłoby zdefiniować to pojęcie, ponieważ można je rozumieć bardzo różnie. Może lepiej po prostu potraktować to jako odchyłki od nominału? Nie rozwinęto również co znaczy: mapa odchyłek dla określonego pola tolerancji.

Całość danych pomiarowych związanych z metrologią długości i kąta (zarówno geometria w skali makro jak i w skali mikro) jest bardzo obszerna i ciekawa. Trochę szkoda, że Doktorant nie rozwinął bardziej ich analizy w formie komentarza i płynących wniosków. Można by rozwinąć co znaczy, że krzywa udziału materiałowego jest najbardziej korzystna dla frezowania (skoro podano tylko wartość parametru S_k). Byłoby to również uzasadnione dla pomiarów

makrogeometrii, gdzie Doktorant zastosował dwa urządzenia o zupełnie różnych maksymalnych błędach dopuszczalnych. Niepewności pomiarów za ich pomocą są zupełnie różne, przy maszynie pomiarowej jest to kilka mikrometrów, a przy skanerze będzie to na poziomie w najlepszym razie kilku setek. To może znacząco zmienić obrazy map odchyłek. Takiej analizy niepewności trochę mi brakuje również przy pomiarach nierówności powierzchni 2D i 3D. Warto się nad tym zastanowić, skoro Autor podaje wartości parametrów topografii do dziesiątych części nanometra (Sk na stronie 44) lub 5 miejsc po przecinku (Ssk na tej samej stronie).

Treść pracy dotyczy właściwie jednej metody spiekania proszków metali tzn. DMLS i nie zostały przebadane modele wykonane za pomocą innych systemów przyrostowych. Można zrozumieć, że typu badania byłyby bardzo kosztowne, jednak – nawet jako pomysł na przyszłość – analiza porównawcza z innymi systemami przyrostowymi byłaby bardzo wartościowa.

We wnioskach końcowych trochę zabrakło mi kierunków badań na przyszłość. Można było tu wspomnieć na przykład o badaniach metod hybrydowych z innymi rodzajami obróbki.

Oceniając stronę edytorską należy podkreślić, że praca napisana została w ogólności poprawnym językiem polskim. Rysunki w większości wykonane są z dbałością i starannością. Nieliczne błędy językowe i stylistyczne przekazałem Autorowi. W niczym nie umniejszają one wartości całej rozprawy.

4. Wnioski

Zaprezentowana rozprawa doktorska jest dziełem zawierającym bardzo ciekawe informacje na temat hybrydowej metody wytwarzania przedmiotów. Jej Autor zmierzył się z nowym i obszernym tematem, wykazując się determinacją do jego zgłębienia i zaprezentowania. Praca napisana jest w sposób jasny i przejrzysty.

Na podstawie przeprowadzonej analizy rozprawy doktorskiej stwierdzam, że tematyka pracy jest żywa i aktualna, została wybrana w sposób trafny, a jej zakres spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Dysertacja w wielu elementach wnosi treści nowe. Cel pracy został osiągnięty w zakresie przyjętym przez Autora. Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne.

5. Podsumowanie

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Łukasza Przeszłowskiego pt.: *Analiza i dobór parametrów szybkiego prototypowania kół zębatych metodą selektywnego spiekania proszków metali*, spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony.

prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski



Politechnika Poznańska