

Kraków, 01.10. 2018 r.

Prof. dr hab. inż. Adam RUSZAJ
POLITECHNIKA KRAKOWSKA
Wydział Mechaniczny
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji
Al. Jana Pawła II 37
31-864 KRAKÓW

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej pt.:

ANALIZA WPŁYWU PARAMETRÓW PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH WYBRANYCH TECHNOLOGII PRZYROSTOWYCH NA GEOMETRIĘ I WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE WYROBÓW

Autor rozprawy: **Mgr inż. Tomasz Kozior**

Promotor: prof. dr. hab. inż. **Czesław Kundera**

Podstawa opracowania recenzji: Zlecenie Dziekana Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej z dnia: 12.07.2018

1. CHARAKTERYSTYKA PRACY

Opiniowana rozprawa poświęcona jest wybranym technologiom wytwarzania przyrostowego, których udział w procesach produkcyjnych dynamicznie rośnie. Wynika to z faktu, że elementy (części maszyn i urządzeń, matryce, kokile czy formy) wytwarzane są przez dodawanie warstw, co eliminuje drogie oprzyrządowanie technologiczne oraz umożliwia tworzenie skomplikowanych kształtów zarówno wewnętrznych jak i zewnętrznych. Oczywiście jakość powierzchni, dokładność kształtowo - wymiarowa oraz właściwości mechaniczne zależą od sposobu wytwarzania warstw oraz od parametrów technologicznych. Jeżeli chodzi o materiały, które możemy zastosować to zależą one od metody wytwarzania warstw. I tak w selektywnym spiekaniu laserowym (SLS) można wykorzystać proszki metali, ceramiki czy tworzyw sztucznych. Natomiast w takich metodach jak FDM czy Poly

Jet lub Poly Jet Matrix zastosowanie znajdują tworzywa sztuczne. Autor opiniowanej rozprawy przedstawia najpierw ogólne problemy i zagadnienia związane w wytwarzaniem przyrostowym (Rozdział 1), następnie przedstawia stan badań na podstawie danych literaturowych oraz przeprowadza własne badania wstępne, niezbędne do właściwego sformułowania celu i zakresu rozprawy. (Rozdział 2). Na podstawie analizy literatury oraz wyników wstępnych badań własnych sformułował cel i zakres pracy (Rozdział 3). W kolejnych Rozdziałach Autor:

- przedstawia program badań własnych (Rozdział 4),
- charakteryzuje stosowane w pracy metody wytwarzania przyrostowego: omawia zasady budowy modeli, parametry technologiczne oraz właściwości mechaniczne elementów (Rozdział 5),
- w oparciu o wyniki pomiarów przeprowadza analizę wymiarowo – kształtową elementów oraz analizuje właściwości technologicznej warstwy wierzchniej elementów wytworzonych wybranymi metodami a następnie formułuje zalecenia dotyczące projektowania elementów 3D. Należy podkreślić, że w rozdziale tym Autor prowadzi rozważania dla elementów rzeczywistych (modeli), które są obecnie wykonywane metodami tradycyjnymi (Rozdział 6),
- przedstawia analizę wyników badań właściwości mechanicznych wytworzonych przyrostowo elementów, zwraca uwagę na takie cechy użytkowe jak relaksacja naprężeń podczas jednoosiowej próby ściskania, zużycie eksploatacyjne czy zmiana gęstości modelu (Rozdział 7),
- charakteryzuje praktyczne zastosowania technologii wytwarzania przyrostowego do wytwarzania uszczelnień np. sprężyste mieszki uszczelniające (Rozdział 8),
- podsumowuje wyniki uzyskane w pracy oraz formułuje wnioski użytkarce dedykowane konstruktorom i technologom stosującym technologie przyrostowe (SLS, FDM, PJM); formułuje również zalecenia do dalszych badań (Rozdział 9).

Powyższa charakterystyka rozprawy uwypukla jej walory, do których zaliczam kompleksowe ujęcie badanych problemów, poprawność metodologiczną wynikającą z układu pracy, poprawność metodyczną w rozwiązywaniu zadań cząstkowych, zastosowanie nowoczesnych urządzeń do wytwarzania przyrostowego oraz nowoczesnego sprzętu metrologicznego i poprawne przeprowadzenie pomiarów,

obszerną prezentację wyników badań i ich analizę w aspekcie zastosowań praktycznych metod wytwarzania przyrostowego.

2. OCENA WYBORU TEMATYKI ROZPRAWY

Praca dotyczy niezwykle istotnych zagadnień kształtowania (wytwarzania) przyrostowego. Zagadnienia te są zgodnie uważane przez specjalistów za jeden z filarów dokonującej się obecnie rewolucji przemysłowej (INDUSTRY 4.0). Wielu naukowców zwraca jeszcze uwagę na jeden fakt (często o nim się nie pamięta w praktyce przemysłowej). Mianowicie wszystkie organizmy występujące w środowisku naturalnym wytwarzane są najdoskonalszymi nanotechnologiami przyrostowymi realizowanymi zgodnie z informacją zapisaną w DNA i RNA. Niektórzy naukowcy (np. nieżyjący już prof. S. Węgrzyn) uważają, że w przyszłości procesy produkcyjne będą realizowane zgodnie z analogicznymi do DNA i RNA programami ukierunkowanymi na przyrostowe wytwarzanie obiektów z dowolnych materiałów. Tych bioinspiracji dostarcza intensywnie rozwijająca się dziedzina nauki „Bionika” – uważana przez niektórych naukowców za istotny element INDUSTRY 4.0. Opiniowana rozprawa stanowi istotną cegiełkę w intensywnie dokonującym się obecnie rozwoju metod przyrostowych. **Z powyższych względów wybór tematyki rozprawy uznaję za uzasadniony zarówno ze względów poznawczych jak i użytecznych.**

3. OCENA MERYTORYCZNA

„Celem opiniowanej rozprawy jest opracowanie eksperymentalnych modeli matematycznych opisujących wpływ parametrów procesów technologicznych wybranych technologii przyrostowych na dokładność wymiarową oraz właściwości mechaniczne wytwarzanych elementów, a szczególnie elementów uszczelnień technicznych”

Tak sformułowany cel Autor zrealizował w następujących etapach: określenie stanu badań w zakresie tematu rozprawy, opracowanie programów badań, realizacja badań wpływu parametrów wejściowych w takich metodach wytwarzania przyrostowego jak SLS, FDM, PJM na dokładność wytwarzanych elementów, właściwości technologicznej warstwy wierzchniej oraz wybrane właściwości mechaniczne, analiza wyników badań oraz charakterystyka wybranych zastosowań praktycznych. Z uwagi na specyficzne cechy badanych metod dla każdej serii badań

Autor dobierał istotne dla badanego przypadku parametry wejściowe i wyjściowe (wskaźniki technologiczne). Z tego względu ocena ogólna przeprowadzonych badań jest utrudniona. Ocena dokonana dla indywidualnych serii badań jest pozytywna: Autor w każdym przypadku wybrał istotne (dla danego wariantu) parametry wejściowe i najważniejsze wskaźniki technologiczne (parametry wyjściowe). Dzięki temu uzyskane wyniki mają duże znaczenie praktyczne. Bardzo cenne jest to, że po przedstawieniu programu badań Autor charakteryzuje procesy, które zamierza badać oraz urządzenia, które w badaniach zastosował. Są to urządzenia dobrej klasy, takie jak Connex 350 Firmy Stratasys (PJM), Formiga P100 (SLS) oraz Dimension 1200es (FDM), co zwiększa wiarygodność i przydatność uzyskanych wyników.

Stosunkowo najwięcej uwagi Autor poświęcił badaniom dokładności wymiarowo – kształtowej. Szczegółowo przebadał dokładność wymiarowo – kształtową elementów połączeń rozłącznych typu wał – tuleja oraz suwak prowadnica. Badania cech geometrycznych elementów obejmowały pomiary średnicy oraz wyznaczenie odchyłek walcowości, okrągłości i prostoliniowości. Pomiary średnic i odchyłki od prostoliniowości wykonał na współrzędnościowej maszynie pomiarowej Prismo Navigator Firmy Zeiss. Do pomiarów odchyłki od walcowości i okrągłości wykorzystał maszynę Talyrond 365. Maszyny te zagwarantowały zadowalającą dokładność pomiarów. Interesujące jest porównanie wyników pomiarów z wymiarami zaprojektowanymi w modelu CAD. Okazuje się, że występują istotne różnice pomiędzy wymiarami rzeczywistych modeli wykonanymi metodami przyrostowymi a wymiarami zadanymi w modelach CAD. Z tego względu rzeczywiste luzy (wskaźniki pasowania) też różnią się od zaprojektowanych w modelach CAD i istotnie zależą od kierunku budowy modelu oraz grubości nakładanej warstwy. Z uwagi na różnice wymiarów rzeczywistych i zaprojektowanych w systemach CAD nie zawsze udaje się uzyskać połączenie, w którym luz zarówno liniowy jak i promieniowy zapewnia dodatnie pole tolerancji umożliwiające montaż elementów (połączenie sworzeń – tuleja). Dlatego projekt elementu w CAD musi być skorygowany na podstawie wyników badań. Wielkość tej korekty wymiarowej zależy od metody wytwarzania przyrostowego (SLS, PJM czy FDM). Z powyższych względów wyniki prezentowane w Rozprawie mają duże znaczenie praktyczne. Analiza wyników badań wskazuje na to, że technologia PJM umożliwia wykonywanie elementów o wymiarach liniowych w 10 klasie dokładności a średnice

elementów walcowych w klasie dokładności 12. Natomiast technologia SLS umożliwia wykonywanie elementów w klasie 10..

Badania właściwości technologicznej warstwy wierzchniej przeprowadzono dla procesu SLS. Pomiarów parametrów struktury geometrycznej powierzchni zrealizowano przy użyciu optycznego profilometru Talysurf CCI Lite Firmy Taylor Hobson. Bardzo ważne jest w tym przypadku to, że Autor, każdy typ próbki wykonał w ilości 3 sztuk. Dla każdej z próbek wykonano pomiary wskaźników struktury powierzchni i w rozważaniach uwzględnił wartości średnie (Tabela 6.11 i 6.13) wskaźników struktury geometrycznej powierzchni. Jako miarę losowości Autor podaje na wykresach (np. Rys. 6.26 – 6.27) rozstęp (przedział zmienności). Wyniki pomiarów Autor przedstawił w postaci tabel, wykresów wyrażających zależność wskaźników struktury geometrycznej powierzchni od parametrów procesu dla różnych grubości nakładanej warstwy oraz przestrzennej wizualizacji powierzchni struktury geometrycznej powierzchni. Przedstawione dane mogą być wykorzystane do projektowania procesu SLS przy kryterium odpowiedniej jakości struktury geometrycznej nakładanych warstw. Niezwykle interesujące wyniki uzyskał Autor analizując strukturę powierzchni z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego JEOL 400. Badania przeprowadził dla powiększeń: 35, 100, 500, 1000 i 2000 X. Celem tych badań było wyznaczenie wpływu gęstości energii dostarczonej do spiekanej warstwy proszku oraz liczby skanowań wiązką laserową (sumarycznie większa ilość dostarczonej energii) na mikrostrukturę przełomu próbek oraz charakter połączeń budowanych warstw. Wyniki badań przedstawiono postaci fotografii. Z ich analizy wynika, że zwiększenie liczby skanowań (czyli sumarycznej ilości energii) korzystnie wpływa na jakość połączenia nakładanych warstw oraz minimalizuje anizotropię właściwości mechanicznych. Uzyskane tutaj wyniki mogą być podstawą do analizy zjawisk zachodzących w obszarze naświetlania. Wyniki tych badań również mają duże znaczenie praktyczne przy doborze parametrów procesu z punktu widzenia kryterium jakości powierzchni, dokładności kształtowo – wymiarowej oraz struktury wewnętrznej wpływającej bezpośrednio na metalograficzną strukturę wewnętrzną a tym samym właściwości mechaniczne wyrobu..

W badaniach właściwości mechanicznych uwzględniono próbki wykonane metodami SLS, PJM oraz FDM. W przypadku technologii SLS Autor wykonał badania wpływu grubości nakładanej warstwy oraz badania wpływu gęstości energii,

kierunku usytuowania modelu na platformie dla dwóch grubości nakładanej warstwy na relaksację naprężeń ściskających. Badania przeprowadził wg dwuczynnikowego kompletnego programu badań. Materiałem do budowy próbek był poliamid PA 2200. Wyniki badań autor przedstawił kompleksowo w postaci tabel, wykresów oraz równań regresji.. Pomiary przeprowadził między innymi na stanowisku pomiarowym: Inspekt Mini 3kN. Z badań tych wynika, że najmniejszą czyli najkorzystniejszą wartość relaksacji naprężeń osiągnięto dla gęstości energii 0.08 J/mm^2 oraz małej grubości nakładanej warstwy dla kierunku usytuowania modelu $P_d = 0$.. Analogiczne badania Autor przeprowadził dla procesu wytwarzania przyrostowego FDM (dla materiału: ABS – model P430). Dla próbek wykonanych metodami SLS oraz PJM Autor przeprowadził badania zużycia tribologicznego na stanowisku Tester T-15. Dla próbek wykonanych metodą SLS Autor przeprowadził również badania wpływu parametrów procesu na gęstość wykonanych próbek. Powyższe kompleksowe badania wpływu podstawowych parametrów procesów SLS, PJM oraz FDM na najważniejsze wskaźniki technologiczne zostały przeprowadzone poprawnie pod względem metodycznym, metrologicznym i stanowią bardzo ważny materiał doświadczalny niezbędny do racjonalnego projektowania procesów technologicznych wyżej wymienionych procesów wytwarzania przyrostowego.

Ostatnie badania zaprezentowane przez Doktoranta dotyczą zastosowania metod wytwarzania przyrostowego do wytwarzania elementów uszczelniających. Autor skoncentrował się tutaj na przyrostowym wytwarzaniu mieszkań uszczelniających.. Na podstawie analizy wyników badań stwierdził, że do wytwarzania elementów sprężystych uszczelnień (mieszeków) może być zastosowana metoda SLS. Wytrzymałość mieszkań na działanie obciążeń osiowych jest wystarczająca z punktu widzenia zastosowań praktycznych. Badania ukierunkowane na bezpośrednie zastosowania praktyczne uważam za bardzo wartościowe podsumowanie pracy. Zostały one (jak wszystkie badania prezentowane w pracy) wykonane poprawnie pod każdym względem: technicznym, metrologicznym i metodycznym i stanowią wartościowy wkład w rozwój technologii wytwarzania przyrostowego.

Ten bardzo obszerny opis badań, prezentację i analizę wyników kończy Autor podsumowaniem i sugestiami dalszych badań, które również oceniam pozytywnie...

Po wnikliwym zapoznaniu się z treścią Rozprawy stwierdzam, że analiza stanu badań, planowanie i opracowanie uzyskanych wyników, poprawność wyboru

stanowisk i oprzyrządowania technologicznego do badań, metodyka badań, realizacja badań, dobór sprzętu pomiarowego, sposób przeprowadzenia pomiarów, sposób obliczeń wskaźników technologicznych, sposób przedstawienia wyników badań oraz ich analiza **prezentują bardzo wysoki poziom merytoryczny, a sformułowany przez Autora cel pracy został w pełni zrealizowany w planowanym zakresie.**

Do zalet pracy zaliczam również kompleksowe ujęcie badanych problemów, poprawność metodologiczną wynikającą z układu pracy oraz poprawność metodyczną w rozwiązywaniu zadań cząstkowych. Wiarygodność uzyskanych wyników wspiera zastosowanie nowoczesnych urządzeń do wytwarzania przyrostowego oraz nowoczesnej aparatury pomiarowej.

Autor wykazał się w realizacji pracy szeroką interdyscyplinarną wiedzą, umiejętnością planowania, organizacji i realizacji badań oraz interpretacji ich wyników. W każdym fragmencie pracy można dostrzec dojrzałość naukową Autora. W realizacji badań doświadczalnych nie ma decyzji przypadkowych, każda z nich została wnikliwie przemyślana i znajduje uzasadnienie w teorii i praktyce badawczej. Podobnie można ocenić analizę wyników badań – dla każdej serii jest ona kompleksowa i wskazuje na bardzo dobrą praktyczną znajomości badanych procesów. Pewien niedosyt może stanowić skromne powiązanie wyników badań doświadczalnych z zjawiskami fizyko-chemicznymi występującymi w obszarze nakładania warstw. Ale te zagadnienia może Autor uzupełnić w przyszłych publikacjach.

Do najważniejszych osiągnięć Autora zaliczam:

1. Kompleksową, wnikliwą i twórczą analizę stanu badań badanych procesów wytwarzania przyrostowego zarówno na podstawie danych literaturowych jak i badań własnych.
2. Zbudowanie bardzo obszernej bazy danych doświadczalnych (technologicznych) o badanych procesach i zjawiskach. Jest to bardzo cenna baza z punktu widzenia projektowania procesów technologicznych. SLS, PJM, FDM.

Podsumowując stwierdzam, że Autor osiągnął założone cele a rozprawa została przygotowana na bardzo dobrym poziomie merytorycznym i zawiera wiele elementów nowości i oryginalności..

4. UWAGI

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 195 stron i składa się z 9 rozdziałów o bardzo zróżnicowanej objętości: od 2 do ~40 stron. W pracy Autor wykorzystuje 88 pozycji literaturowych (2 własne), 12 norm, 7 patentów, własne zgłoszenie patentowe dotyczące przyrządu do badań wytrzymałościowych mieszków oraz 7 stron internetowych. Wyniki prezentuje na ponad 100 rysunkach, w około 60 tabelach oraz kilkunastu równaniach regresji. Nazewnictwo stosowane w pracy jest generalnie poprawne ale jak sam Autor stwierdził nazewnictwo w zakresie metod wytwarzania przyrostowego jest nieuporządkowane. W literaturze wymiennie stosuje się określenia: wytwarzanie przyrostowe, wytwarzanie warstwowe, druk 3D, technologie warstwowe. Zresztą Autor też powyższe określenia stosuje w pracy wymiennie. Praca zawiera materiał doświadczalny, który można by wykorzystać nawet w dwóch pracach doktorskich. Oczywiście nie sugeruję, że praca jest zbyt obszerna bo utraciłaby wtedy jedną z podstawowych zalet: **kompleksowość rozwiązywania problemów technologicznych**. Pod względem stylistycznym, gramatycznym i językowym praca jest generalnie poprawna. Chociaż sporadycznie zdarzają się potknięcia językowe: np. „szybki czas” zamiast „krótki czas”, „wysoki skurcz” zamiast „duży skurcz” (Tabela 5.4), „darmowe programy” zamiast „bezpłatne programy” (str.16 w⁴). Ponadto zwykle w technikach wytwarzania stosuje się określenie „obróbka wykończeniowa” a nie „wykańczająca” – jak zastosował w kilku miejscach Autor.

Autor słusznie uwzględnił w swoich rozważaniach fakt, że badane procesy charakteryzują się znaczną losowością. Jako miarę losowości stosuje rozstęp czyli przedział zmienności wyników pomiarów (np. wymiarów próbek, czy parametrów struktury geometrycznej powierzchni). Jest to bardzo ważne w analizie wyników badań czy projektowaniu procesów technologicznych. Jak już wspominałem część wyników badań Autor przedstawił w postaci równań regresji. Niestety ich praktyczna przydatność jest ograniczona bo Autor nie sprawdził ich adekwatności oraz istotności współczynników regresji.

Autor na str. 19 (pod Tabelą 1.1) stwierdza: „Niniejsza praca doktorska jest pracą eksperymentalną.....” i konsekwentnie realizuje to założenie w całej pracy. Przekłada się to na brak wnikliwej analizy zjawisk zachodzących w obszarze nakładania materiału i powiązania jej z interpretacją wyników badań. Oczywiście w tej pracy było to niemożliwe bo zwiększyłoby istotnie jej objętość. Ale gdyby tą uwagę Autor uwzględnił w swoich dalszych publikacjach to ich wartość naukowa na pewno wzrosłaby istotnie.

4. WNIOSEK KOŃCOWY

Uważam, że recenzowana rozprawa generalnie prezentuje bardzo dobry poziom merytoryczny zawiera wiele elementów nowości i oryginalności i stanowi istotny i oryginalny wkład w rozwój technologii wytwarzania przyrostowego a w szczególności SLS, PJM, FDM. Z tego względu wnioskuję o „**WYRÓŻNIENIE**” recenzowanej pracy. Ponadto uważam, że Autor wykazał się szeroką interdyscyplinarną wiedzą, docieklivością, umiejętnością doboru urządzeń do realizacji procesów wytwarzania przyrostowego czy sprzętu pomiarowego, umiejętnością planowania i realizacji badań doświadczalnych oraz wnikliwej analizy i krytycznej oceny uzyskanych wyników, co pozytywnie świadczy o Jego predyspozycjach do realizacji prac badawczych i cechach osobowych jako pracownika naukowego.

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska opracowana przez

Mgr inż. Tomasza KOZIORA pt.:

**ANALIZA WPŁYWU PARAMETRÓW PROCESÓW TECHNOLOGICZNYCH
WYBRANYCH TECHNOLOGII PRZYROSTOWYCH NA GEOMETRIĘ I
WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE WYROBÓW**

spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy i może być dopuszczona publicznej obrony.

