
dr hab. inż. Bartosz GAPIŃSKI, prof. PP
Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych
Instytut Technologii Mechanicznej
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-965 Poznań
e-mail: bartosz.gapinski@put.poznan.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Mateusza KIEŁBICKIEGO pt.**

***METODYKA PROJEKTOWANIA I WYTWARZANIA SYSTEMÓW
MOCOWAŃ PRZYRZĄDÓW SPAWALNICZYCH
WYTWARZANYCH TECHNIKAMI PRZYROSTOWYMI
DLA PRZEMYSŁU LOTNICZEGO***

Promotor: prof. dr hab. inż. Grzegorz BUDZIK

Promotor pomocniczy: dr inż. Joanna WOŹNIAK

Podstawa opracowania recenzji:

Decyzja Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z dnia 27.11.2024 – pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny nr RM-530-06-02/2024 z dnia 27.11.2024.

1. Wprowadzenie

Nieustanny rozwój świata związany jest z ciągle pojawiającymi się innowacjami. Są one odpowiedzią na zapotrzebowanie ludzi związane głównie z możliwością pozyskiwania dóbr i poprawą warunków życia m.in. poprzez redukcję kosztów. Z tych powodów konieczne jest poszukiwanie rozwiązań technologicznych, które m.in. pozwolą w przyszłości na obniżenie kosztów wytworzenia.

Przykładem takiego rozwiązania są rozwijane od lat osiemdziesiątych XX wieku metody addytywne. Na początku pozwalały na szybkie wytwarzanie prototypów lub fizyczną wizualizację przestrzenną zamodelowanych komputerowo elementów. Obecnie techniki addytywne zwane drukiem 3D stały się popularne i w pewnym stopniu powszechne, obejmując bardzo szeroki wachlarz możliwości zarówno materiałowych, jak i sposobów wytwarzania. Pozwala to zarówno na wytworzenie nisko kosztowe np. prostych elementów z tworzyw sztucznych na potrzeby domowe, ale też wykonywanie zaawansowanych geometrycznie obiektów z metalu. Coraz szersza grupa technik przyrostowych pozwala na uzyskanie wyrobów mogących w pełni znajdować zastosowanie w codziennej praktyce przemysłowej zastępując wyroby wytwarzane tradycyjnymi metodami.

Druku 3D z metali wiąże się z pewnymi ograniczeniami, które są naturalne dla każdego procesu wytwórczego. Jednocześnie techniki te pozwalają na wytworzenie elementów o prawie dowolnym kształcie, co często jest niemożliwe tradycyjnymi metodami. Z tego powodu metody addytywne znajdują coraz więcej zastosowań, nawet jeśli koszt wytworzenia pojedynczego elementu wydaje się być większy, to suma korzyści wynikających z takiego wyrobu pozwala na ocenę pozytywną takiego rozwiązania.

Przykładem jest choćby zastosowanie druku 3D z metalu do wytwarzania oprzyrządowania spawalniczego, jak zrobił to autor ocenianej rozprawy doktorskiej. Pan mgr inż. Mateusz KIELBICKI podjął się tego zadania wzbogacając je m.in. o badania w zakresie kanałów chłodzenia konformalnego. Z tych powodów należy uznać, że podjęty temat rozprawy jest jak najbardziej aktualny i spełnia wymagania nowości w tym zakresie. Również kierowany przez prof. Grzegorza BUDZIKA zespół, w którym powstała praca, od wielu lat zajmuje się technikami przyrostowymi, co dodatkowo wpłynęło na pozytywny odbiór pracy i możliwości uzyskania prezentowanych rezultatów.

Reasumując oceniana rozprawa doktorska wpisuje się w najnowsze trendy zarówno jeżeli chodzi o obszar konstruowania, techniki wytworzenia, jak i procesy technologiczne. Biorąc pod uwagę te obszary należy stwierdzić, że podjęcie tego tematu było działaniem słusznym. Co równie ważne uzyskane efekty mają potencjał aplikacyjny, a ich wdrożenie jest możliwe nie tylko w miejscu realizacji badań tj. Pratt & Whitney w Rzeszowie.

2. Układ i obszar merytoryczny rozprawy

Recenzowana praca zawiera 130 stron i składa się z 6 rozdziałów. Poprzedzają je nienumerowane spis treści oraz wykaz ważniejszych oznaczeń. Po rozdziale szóstym Autor zawarł nienumerowaną bibliografię oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Właściwa część rozprawy zawiera następujące elementy:

Rozdział 1 – *Wstęp* – w rozdziale tym Autor dokonał wprowadzenia do tematu pracy podając dane dotyczące metod wytwarzania, obszarów rynku gdzie metody addytywne są stosowane oraz wpływ technik druku 3D na dochody poszczególnych typów przedsiębiorstw.

Rozdział 2 – *Analiza stanu zagadnienia* – w rozdziale tym Doktorant zawarł informacje dotyczące konstrukcji oprzyrządowania spawalniczego, w tym uchwytów adaptacyjnych i kontrolno-pomiarowych. Przedstawił również zagadnienia dotyczące wymagań dokładnościowych przyrządów stosowanych w różnych procesach produkcyjnych, stosowane

materiały konstrukcyjne oraz techniki druku 3D. Kolejnym omówionym aspektem są techniki spawania, jakie można zastosować w zależności od rodzaju wyrobu oraz stosowane w tych procesach oprzyrządowanie. Pan Mateusz KIEŁBICKI przedstawił również możliwości chłodzenia z zastosowaniem kanałów konformalnych.

Rozdział 3 – *Cel i zakres pracy* – zgodnie z tytułem Autor zaprezentował cel i zakres pracy uzasadniając wybór podjętego tematu. W punktach wymienił poszczególne etapy prac badawczych, a także scharakteryzował przedsiębiorstwo Pratt & Whitney Rzeszów, w którym realizował swój doktorat wdrożeniowy.

Rozdział 4 – *Metodyka badawcza* – Doktorant przedstawia składający się z dwóch elementów model badawczy stanowiący podstawę dalszych prac. Następnie opisał prototypy: koncepcyjny, numeryczny, wizualny, technologiczny i jego model fizyczny, a także przeprowadził symulacje komputerowe dla prototypu technologicznego. Opisał również przeprowadzone badania laboratoryjne i na wydziale produkcyjnym prototypu technicznego.

Rozdział 5 – *Realizacja badań* – obejmuje prezentację poszczególnych badań i uzyskane wyniki. Autor opisał warianty modelu badawczego i możliwości jego wykonania. Kolejny podrozdział zawiera wyniki symulacji dla rozkładu ciepła oraz symulacji wytrzymałościowych MES. Następnie Doktorant przedstawił wyniki dotyczące szybkości chłodzenia podczas eksperymentów zrealizowanych w warunkach laboratoryjnych oraz produkcyjnych.

Rozdział 6 – *Podsumowanie i wnioski* – zgodnie z tytułem rozdziału Autor opisał poznawcze wnioski naukowe, jak i użytkowe oraz plany dalszych badań..

Pracę wieńczy nienumerowana bibliografia obejmująca 184 pozycje w tym 3 współautorskie doktoranta oraz streszczenie rozprawy w języku polskim i w języku angielskim.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Oceniana dysertacja jest interesującym opracowaniem zawierającym szereg informacji na temat procesów spawania oraz przyrządów spawalniczych. Autor przeprowadził proces projektowania opracowując prototypy: koncepcyjny, numeryczny, wizualny, technologiczny i jego model fizyczny. Przeprowadził również symulacje numeryczne oraz badania laboratoryjne i przemysłowe w oparciu o wykonane z użyciem technik przyrostowych przyrząd spawalniczy.

Należy podkreślić, iż wyniki pracy Pana mgr. inż. Mateusza KIEŁBICKIEGO mogą być stosowane zarówno w dalszych pracach badawczo-laboratoryjnych, jak i projektowaniu oprzyrządowania spawalniczego do procesów produkcyjnych. Przedstawiona treść rozprawy doktorskiej pozwala pozytywnie ocenić wiedzę i doświadczenie Autora utwierdzając czytającego w przekonaniu, że posiada On odpowiednie kompetencje do realizacji podjętego tematu. Również ośrodek naukowy, w którym prowadzone były prace jakim jest Politechnika Rzeszowska oraz firma Pratt & Whitney w Rzeszowie, od wielu lat zajmuje się tematyką szeroko pojętego druku 3D. To wszystko pozwoliło Doktorantowi na sformułowanie końcowego wniosku o poprawności zrealizowanych prac i słuszności założeń podjętych przy projektowaniu i badaniach spawalniczych systemów mocowania wykonanych techniką przyrostową.

W przedstawionej do oceny dysertacji Doktorant zawarł stosowny przegląd literatury, powołując się na odpowiednie publikacje. Pozwoliło to na poprawne przedstawienie poszczególnych zagadnień i dowodzi znajomości podjętej materii. Wszystkie te aspekty

niewątpliwie potwierdzają możliwości i umiejętności Autora do prowadzenia badań naukowych i formułowania właściwych wniosków z nich płynących. Jednak pomimo ogólnego pozytywnego odbioru wskazać można pewne fragmenty i sformułowania, które prezentują bardziej szczegółowo w postaci uwag krytycznych i polemicznych:

- Ogólna uwaga dotycząca układu pracy - Autor w rozdziale czwartym opisał metody badawcze, natomiast w rozdziale piątym przedstawił wyniki. W przypadku ocenianej rozprawy, w której wykonano szereg badań, układ taki utrudnia weryfikację poszczególnych etapów. W mojej ocenie lepszy układ pracy to taki, gdzie omawiane są poszczególne zadania badawcze wraz z adekwatnymi wynikami badań.
- Str. 7 – Wykaz ważniejszych oznaczeń – szkoda, że Autor nie zaprezentował wykazu skrótów w porządku alfabetycznym. W opisie metod TIG i MIG wkradł się błąd – TIG to „*metoda spawania elektroda wolframowa*” a nie „*spawanie metodą elektroda wolframowa*”, a MIG to nie jest „*spawanie metodą metalową...*”.
- Str. 10 – Autor pisze, że „*Druk 3D oferuje wiele zalet. takich jak szybkie prototypowanie, redukcję kosztów...*”. Druk 3D nie oferuje szybkiego prototypowania, ale umożliwia realizację procesu szybkiego prototypowania, który obejmuje więcej aspektów niż jedynie wykonanie części.
- Str. 10 – Doktorant w całej pracy używa określenia „*technologie przyrostowe*”. W mojej ocenie powinno się mówić o „*technikach przyrostowych*”
- Str. 10 – mgr inż. Mateusz KIEŁBICKI w całej pracy prezentuje cytowania w formie zbiorczej podając na końcu fragmentu / akapitu kilka pozycji literaturowych. Lepiej byłoby wzorem zasad stosowanych w publikacjach łączyć poszczególne informacje z odpowiadającą im pozycją literaturową.
- Str. 11 – Autor pisze, że „*Z uwagi na małoseryjny charakter produkcji lotniczej każde oprzyrządowanie może być dostosowane do specyficznych potrzeb danego komponentu*”. Należało raczej napisać – „*musi być*” dopasowane do potrzeb wyrobu, gdyż to warunkuje poprawność jego wykonania i efektywność całego procesu.
- Str. 11 – Autor pisze „*Niezwyczajnym udogodnieniem dla konstruktorów jest zatem możliwość szybkiego tworzenia prototypów...*”. W obecnych czasach trudno to traktować jako „*niezwykłe*” udogodnienie.
- Str. 15 / rys. 2.2. – na zaprezentowanym zdjęciu trudno zaobserwować modułowość systemów mocujących.
- Str. 18 – Doktorant pisze „*... uchwyty adaptacyjne, to takie które potrafią dopasować swoją formę do geometrii obiektu podanego poddanego obróbce*”. Zamiast słowa „*forma*”, które jest kalką z języka angielskiego powinno używać się polskiego słowa „*kształt*”.
- Str. 20 / rozdz. 2.1.4. – Autor pisze: „*Sensory są obecnie nieodłącznym elementem produkcji automatycznej.*” Warto by doprecyzować, czy tyczy się to także uchwytów, które są częścią składową realizacji procesu produkcyjnego? Sensory umożliwiają m.in. automatyzację produkcji i nadzorowanie.
- Str. 20 – Doktorant opisuje dwa typy systemów stosowanych w uchwytach i pisze, że „*dostarczają (one) istotnych danych sensorycznych*”. Czy Autor miał na myśli dane pochodzące z sensorów?

-
- Str. 21 – Autor pisze o uchwytach hybrydowych, które są z opisu praktycznie takie same, jak uchwyty kontrolno-pomiarowe. Może warto było połączyć rozdziały 2.1.4 i 2.1.5? Dalej na tej samej stronie mgr inż. Mateusz KIEŁBICKI pisze, że w dwóch artykułach – 63 i 64 wg. spisu literatury - opisane jest kluczowy problem mechanizmu kinematyki równoległej. Nie wymienia / opisuje jednak tego problemu. Podobnie powołując się na publikacje 67 wg. spisu literatury, Autor pisze, że przedstawia ona m.in. „dalsze kierunki badań” – nie wymienia ich jednak.
 - Str. 21 / rozdz. 2.2. – rozdział nazwano „Dokładność przyrządów” – dobrze byłoby doprecyzować w samym tytule, że chodzi przyrządy spawalnicze.
 - Str. 23 – Autor pisząc o dokładności wykonania uchwytów pisze: „Należy jednak pamiętać, że przyrząd składa się z wielu elementów, które wykonywane są z tzw. tolerancją warsztatową (wymiary nietolerowane)”. Nie jest to prawda, ponieważ tzw. wymiary nietolerowane wykonywane są i tak w jakiejś klasie tolerancji np. 14 i nie ma tu pełnej dowolności. Ponadto, trzeba pamiętać, iż są powierzchnie, które nie wymagają obróbki lub wystarczająca jest obróbka zgrubna. Jednocześnie powierzchnie bazowe i/lub służące do montażu, należy obrobić tak, by zachować wymagane parametry w całym łańcuchu pomiarowym.
 - Str. 31 – Autor opisując metodę UAM pisze, że „...cechuje się (ona) wysoką precyzją...”. W rozprawie doktorskiej należałoby sprecyzować takie informacje podając choćby zakres dokładnościowy w stosowanych jednostkach miary.
 - Str. 44 – Doktorant pisząc o hybrydowych formach wtryskowych używa określenia „dynamiczne kanały chłodzenia”. Warto by doprecyzować jak rozumieć dynamikę tych kanałów.
 - Str. 50 – Autor przedstawił kolejne etapy badań (cele pomocnicze). Zastanawiająca jest kolejność prac, szczególnie w kontekście szybkiego prototypowania, ponieważ zaczynają się one od wykonania prototypu fizycznego, a dopiero potem prowadzi się symulację komputerowe. W mojej ocenie lepiej byłoby rozpocząć do symulacji celem weryfikacji założeń o testowania różnych wariantów, a dopiero wówczas przejść do wykonania kosztownego modelu fizycznego. Uwaga ta dotyczy również etapów pracy przedstawionych w punkcie 3.3.
 - Str. 53 – mgr inż. Mateusz KIEŁBICKI pisze, że przyjęta do badań grubość blachy stanowi średnią grubość elementów produkowanych w Pratt & Whitney Rzeszów. Można było jednak zweryfikować na ile wzrost lub redukcja grubości blachy wpływa na zmianę temperatury w ocenianym procesie.
 - Str. 54-55 – Doktorant zaprezentował rysunki dwóch elementów składowych projektowanej części badawczej. W mojej ocenie brakuje w nich bardzo istotnych parametrów, jakimi są tolerancje prostopadłość i współśrodkowość tych dwóch elementów. Szczególnie ten drugi aspekt ma znaczenie, gdyż wielkość szczeliny ma wpływ na jakość połączenia spawanego i konieczność dostarczenia odpowiedniej porcji energii w procesie łączenia.
 - Str. 57 – w opisie prototypu koncepcyjnego (rozdz. 4.2) można było zawrzeć bardziej szczegółowy opis, gdyż rozdział zawiera się praktycznie na jednej stronie. Ponadto zawiera on „uchwyt”, który nie był wcześniej zdefiniowany, a jest elementem kluczowym.
 - Str. 58-59 / rozdz. 4.3 – Autor przedstawił trzy przykłady układu chłodzenia - konwencjonalny i dwa warianty z kanałami konformalnymi. Nie podał natomiast jakie są dalsze wymagania dla

projektowania. Píše również: „*W toku badań zdefiniowano wstępne parametry geometryczne uchwytów...*”. Nie podaje jednak żadnych wyników potwierdzających te badania i dobór średnicy podstawy wynoszący 110 mm oraz grubość 20 mm. Również zdefiniowano kanały o średnicy 4,5 mm, podając jedynie, że wartościami granicznymi dla przyjętej techniki druku 3D jest średnica 5 mm. Dlaczego nie przeprowadzono symulacji (lub nie pokazano wyników) dla kanałów o mniejszych średnicach – może większa liczba mniejszych kanałów byłaby bardziej efektywna? Autor nie skomentował również na jakiej podstawie przyjął kształty kanałów zaprezentowane na rys. 4.9 i 4.10.

- Str. 60 / rys. 4.11 – Doktorant prezentuje „*Wstępne symulacje wyników...*”. Zakładam, że chodzi o wyniki symulacji, a na rysunkach pokazano rozkład zmiany temperatury. Nie wspomniano natomiast którego momentu procesu dotyczą przedstawione obrazy, a wartości liczbowe są nieczytelne. W mojej ocenie ten wstępny etap powinien zawierać zdecydowanie więcej danych.
- Str. 60 / rozdz. 4.4 – Autor używa sformułowania „*Po wyborze optymalnej geometrii kanałów przystąpiono do wytwarzania...*” nie podaje jednak opisu parametrów / kryteriów optymalizacji.

Dalej w tym samym rozdziale Doktorant opisuje demonstrator wykonany techniką PolyJet w celu wstępnej oceny możliwości wykonania kanałów oraz wykrycia błędów wytwarzania. Mam wątpliwość, czy stosowanie metody PolyJet jest adekwatne do oceny później stosowanej metody druku 3D z metalu. Autor wspomina również na str. 62 o doborze wymiarów kanału doprowadzającego argon – jest to pierwsze wspomnienie w pracy o konieczności zastosowania takiego elementu konstrukcyjnego.

- Str. 62 / rozdz. 4.5 – zastanawiająca jest konieczność / potrzeba tworzenia modelu technologicznego. Ponadto na rys. 4.14a Autor prezentuje nowy układ kanału chłodzącego nie wspominając w treści o takiej zmianie. Dyskusyjna jest również potrzeba wydzielania podrozdziału zajmującego mniej niż stronę.
- Str. 63 – Doktorant podaje informację o wykonaniu kilkudziesięciu prób i symulacji prototypów technicznych. Dlaczego nie przedstawiono wyników tych prób i symulacji?
- Str. 63 – w dalszej części rozdziału Autor opisując wydruk z aluminium pisze, że wykonano obróbkę mechaniczną „... *otwory gwintowane, aby zapewnić precyzyjne dopasowanie ...*”. Połączenia gwintowe z natury nie pozwalają na precyzyjne dopasowanie, do tego celu powinno stosować się np. połączenie kołkowe. Ponadto zaprojektowany uchwyt wydrukowano, a następnie podano obróbce mechanicznej, która umożliwiła uzyskanie odpowiedniej dokładności. W związku z tym można zadać pytanie, czy celowe jest stosowanie tak dokładnej techniki druku 3D.
- Str. 64-65 – na rysunkach 4.17-4.19 mgr inż. Mateusz KIEŁBICKI prezentuje wyniki pomiaru wykonane za pomocą tomografu. Zaobserwować można elementy z trzema nowymi, nie omawianymi wcześniej, układami kanałów wewnętrznych. Ponadto jeden z wariantów cechuje się dwoma otworami wyjściami lub wyjściowymi (nie zostało to opisane). Zachodzi zatem pytanie, dlaczego nie spróbowano zastosować dwóch niezależnych kanałów, w których medium płynęłoby w dwóch przeciwnych kierunkach?
- Str. 65 – „... *symulację komputerową na prototypie ...*” – raczej powinno się mówić „*badania prototypu*” lub „*w oparciu o prototyp*”. Zastanawiające jest dlaczego konieczne było wykonanie prototypu

technicznego do procesu symulacji komputerowej? Czy bardziej poprawne nie byłoby odwrócenie tego procesu tzn. symulacja, ewentualne korekty i dopiero wykonanie?

- Str. 67 / rys. 4.21 – Autor przedstawił przykładowe wyniki przewodnictwa cieplnego dla stosowanego materiału. Niestety rysunki są nieczytelne i nie wiadomo czego dokładnie dotyczą te dane.
- Str. 68 – Autor prezentuje wynik prędkości spawania na próbkach prostokątnych ze spoiną prowadzoną po linii prostej. W analizowanym przypadku spoina ma kształt okręgu z przeszkodą dla prowadzenia palnika w postaci rurki. Czy nie było celowe zweryfikowanie czasu spawania dla takiego wariantu? Ponadto spawając po okręgu w momencie kiedy następuje jego zamknięcie źródło ciepła znajduje się w miejscu rozpoczęcia spawania i następuje dodatkowe ogrzanie tej strefy. Wydaje się być to punkt newralgiczny.
- Str. 69 – Doktorant prezentuje proces symulacji odprowadzania ciepła. Uważam, że powinien w tych analizach uwzględnić także prędkość przepływu cieczy w kanałach chłodzących (choć jest ona w pewnym sensie ujęta w postaci ciśnienia roboczego). Drugi czynnik to temperatura cieczy chłodzącej na zasilaniu.
- Str. 73 – Dla każdego z trzech uchwytów przeprowadzono po pięć procesów spawania. Myślę, że można był się pokusić o większą próbę badawczą. Analizowano w tym przypadku temperaturę, którą rejestrowano co 1 min. Uważam, że jest to zbyt długi odcinek czasu i szczególnie w pierwszej fazie stygnięcia powinno się rejestrować temperaturę co kilka sekund.
- Str. 76 – Doktorant pisze o dodatkowo zamodelowanych „*radiatorach*” pozwalających na odprowadzanie ciepła. Nie przedstawił jednak wyników symulacji lub badań obejmujących ich zalecany kształt, wymiary itp.
- Str. 77 – Autor ponownie podaje, że „*Na podstawie wyników badań i symulacji ustalono średnicę kanału na $\varnothing 4,5\text{ mm}$* ”. Nie przedstawił jednak w dysertacji wyników potwierdzających takie prace.
- Str. 79 – Mgr inż. Mateusz KIEŁBICKI opisując wyniki prezentowane na rysunkach 5.9-5.20 podaje, że symulacja chłodzenia obejmowała 10 min. Pytanie czy taki układ ma sens praktyczny. W mojej ocenie procesu spawania wykonuje się w trybie „*ciągłym*” tzn. sztuka po sztuce bez czekania na jego wychłodzenie. Podobnie jest z formami wtryskowymi, gdzie utrzymywana jest pewna stała temperatura zapewniająca stabilizację procesu wytwarzania. Uwagę tę można odnieść również do informacji zawartych na str. 106.
- Str. 80 / rys. 5.9-5.20 – Analizując rozkład temperatury na poszczególnych rysunkach można zaobserwować, że uchwyt z wkładkami miedzianymi nagrzewa się do około 140 °C, a drukowany z aluminium do około 300 °C. Czy zatem nie byłoby celowe stosowanie dodatkowych wkładek miedzianych w uchwytach drukowanych 3D z kanałami chłodzącymi.
- Str. 92 – po okresie chłodzenia (10 min) temperatura uchwytu spada do około 22-25 °C. Brakuje wskazania jaką przyjęto do symulacji temperaturę otoczenia, a jaką cieczy chłodzącej.
- Str. 94-95 / rys. 5.31-5.33 – wartości naprężeń dla uchwytu w wersji 1 są około 10x większe niż dla wersji 2 i 3. Nie wyjaśniono z czego wynika tak znacząca różnica. Ponadto na wskazanych 3 rysunkach skala została dobrana w sposób praktycznie uniemożliwiający obserwację rozkładu zmian wartości.

-
- Str. 95 – Autor podaje, że prezentuje wartości „*zmierzone*”, natomiast są to wyniki symulacji. Należy rozróżniać takie źródła informacji.
 - Str. 97 / rozdz. 5.3.2 – Doktorant przedstawiając wyniki badań laboratoryjnych pisze, że w etapie 1 nagrzewa uchwyt do 150 °C. Jak mają się te wartości do uzyskanych w symulacjach około 300 °C (rys. 5.12 / 5.15 / 5.18)?
 - Str. 98-100 / rys. 5.36-5.41 – rejestracja danych co 60 sek. jest w mojej ocenie zbyt rzadka, szczególnie w okresie intensywnego chłodzenia ciecżą. Dlaczego na wykresach odpowiadających czujnikowi umieszczonemu wewnątrz uchwytu nie przedstawiono danych dla początkowego etapu tj. czas 0-25 sek. dla chłodzenia ciecżą i 0-265 sek. dla chłodzenia swobodnego?
 - Str. 103 – Doktorant pisze, że w momencie zakończenia procesu spawania uruchamiano agregat chłodzący. Pozwoliło to na ocenę efektywności chłodzenia. Dlaczego nie zbadano również wariantu, w którym agregat pracuje również podczas procesu spawania – byłoby to bardziej efektywne z punktu widzenia chłodzenia.
 - Str. 103 / rozdz. 4.5.2 – Autor podaje na rysunkach 5.45-5.47 uśrednione wartości odnoszące się do procesu chłodzenia podczas spawania. Brakuje informacji nt. wartości rozrzutów zrzutów albo innej informacji potwierdzającej powtarzalność procesu.
 - Str. 103 – Doktorant podaje, że po okresie chłodzenia temperatura utrzymuje się na poziomie około 25 °C. Dlaczego temperatura stabilizuje się na tym poziomie?
 - Str. 107 – mgr inż. Mateusz KIEŁBICKI pisze, że *„Nowe modele uchwytów wykazały się znacznie lepszymi właściwościami termicznymi, co przekłada się na krótszy czas chłodzenia oraz mniejsze zużycie elementów spowodowane wysoką temperaturą”*. Z czego wynika przyspieszone zużycie elementów? Temperatura rzędu 200-300 °C nie jest nadmiernie wysoka dla elementów wykonanych z metalu i raczej nie powinna powodować nadmiernego zużycia.
 - Str. 108 – Autor pisze że *„Na podstawie wyników badań stwierdzono że wszystkie opracowane uchwyty z wewnętrznymi kanałami chodzącymi nie tylko skracają czas chłodzenia 10-krotnie, ale także mogą zwiększyć trwałość oraz niezawodność oprzyrządowania spawalniczego”*. Brakuje jednak w rozprawie informacji dotyczących drugiej części stwierdzenia.
 - Str. 109 – Doktorant napisał, że *„Symulacje komputerowe i badanie empiryczne pomogły zidentyfikować najbardziej efektywne układy chłodzenia”*. Szkoda, że nie przedstawił w dysertacji wyników, które potwierdzają ten proces identyfikacji najkorzystniejszych rozwiązań.
 - Str. 112 – Podsumowując uzyskane rezultaty można zadać pytanie, czy zaprojektowanie wewnętrznej struktury przestrzennej zamiast litej w uchwycie dałoby lepszy efekt odprowadzenia ciepła?

Podczas opracowania niniejszej rozprawy Doktorant nie ustrzegł się także pewnych błędów edycyjnych i językowych. Przytaczam dla porządku kilka przykładów:

- W całej pracy znaleźć można liczne literówki, które powinno się usunąć na etapie edycji pracy.

-
- Str. 6 – Spis treści – uwaga do tytułów podrozdziałów 4.7; 4.8; 4.9 – w mojej ocenie niepotrzebne jest słowo „przeprowadzenie” – wystarczyłoby np. „Badania laboratoryjne...” zamiast „Przeprowadzenie badań laboratoryjnych...”. Również nie powinno się mówić „badania na prototypie” – są to „badania prototypu” lub „w oparciu o prototyp” itp.
 - Str. 14 – pierwszy akapit jest napisany niegramatycznie.
 - Str. 19 – Doktorant pisze: „Ciekawym rozwiązaniem uchwytów tego typu są uchwyty na zasadzie dopasowujących się pinów ułożonych w szeregu. Uchwyty zwykle składają się z podstawy oraz regulowanych kołków, które dopasowują się do konkretnej powierzchni.” Niepotrzebnie użyto dwukrotnie słowa uchwyt – można by napisać „Ciekawym rozwiązaniem tego typu uchwytów pracujących na zasadzie ...”. Również niepotrzebnie Pan mgr inż. Mateusz KIEŁBICKI używa na ten sam element określenia „pin” oraz „kołek”.
 - Str. 26 – opisując cechy druku 3D Doktorant pisze, że pozwalają one uzyskać „szybszy czas wykonania” – taki czas może być krótszy, ale nie szybszy.
 - Str. 27 – Autor używa sformułowania „... w kluczowych źródłach wymieniono...”. Brakuje tu informacji, jakie źródła ma na myśli.
 - Str. 29 / rozdz. 2.4.1 – Tytuł rozdziału brzmi: „Technologie druku 3D z metalu w oprzyrządowaniu”. Nie do końca wiadomo co Autor miał na myśli – czy chodzi o wydruk z zastosowaniem oprzyrządowania, czy może jednak stosowanie elementów wykonanych z użyciem druku 3D do budowy oprzyrządowania, a może jeszcze coś innego?
 - Str. 33 – Autor zastosował skrót myślowy pisząc o grupie metod LPF, iż proces realizowany jest „... za pomocą intensywnego lasera ...”. Określenie to jest nieprecyzyjne – chodziło zapewne o „skupioną wiązkę lasera”.
 - Str. 53 – Doktorant opisując opracowany przez siebie model badawczy pisze, że kołnierz „posiada otwór”. Nie powinniśmy personifikować badanych elementów – otwór jest elementem konstrukcyjnym.
 - Str. 75-76 – Autor niepotrzebnie używa wymiennie określeń „kanały” i „kanałki” oraz „tuleje” i „tulejki”. Należałoby ujednolicić nomenklaturę i raczej stosować „kanały” i „tuleje”.
 - Str. 100 – Autor podaje, że „...zebrał dane przez czujnik argonowy...”. Chodziło zapewne o czujnik temperatury umieszczony w kanale argonowy.

Na pozytywną ocenę zasługuje strona graficzna pracy. Autor opracował szereg rysunków i wykresów, które w sposób przejrzysty i bardzo pomocny wprowadzają w temat rozprawy i zwiększają percepcję uzyskanych rezultatów. Podsumowując można stwierdzić, iż wskazane drobne błędy gramatyczne i edycyjne nie wpływają negatywnie na całościowy odbiór dysertacji.

4. Wnioski

Zawarte w niniejszej recenzji uwagi krytyczne i zasygnalizowane nieścisłości mają wpływ na ogólne postrzeganie ocenianej dysertacji, jednak nie zmienia to faktu, iż Autor przedstawił

koncepcję naukową, co dowodzi, że opanował podstawy metodologii i metodyki pracy badawczej, niezbędne do prowadzenia badań. Oceniana praca jest dziełem zawierającym zbiór informacji na temat procesów spawalniczych i metod przyrostowych oraz możliwość ich zastosowania przy projektowaniu i wykonywaniu oprzyrządowania spawalniczego. Zawiera również wyniki badań mających na celu opracowanie najkorzystniejszej, pod kątem chłodzenia, konstrukcji uchwytu spawalniczego.

Zaproponowanie metod szybkiego prototypowania wraz z technikami przyrostowymi pozwala na otwarcie nowych możliwości w zakresie projektowania i wytwarzania oprzyrządowania spawalniczego. Metody druku 3D pozwalają na nowe podejście do projektowania takich uchwytów m.in. poprzez modelowanie kanałów konformalnych o praktycznie dowolnym kształcie. Ponadto możliwe jest szybkie wykonanie poszczególnych elementów uchwytu, nawet jeśli wymagany jest skomplikowany kształt przestrzenny, lub konieczna jest obróbka wykańczająca.

Zaproponowane przez Doktoranta rozwiązanie należy traktować jako studium przypadku pozwalające na poprawny dobór poszczególnych etapów projektowania ukierunkowanych na techniki druku 3D z metalu. Jest to istotny wniosek utylitarny płynący z ocenianej rozprawy doktorskiej.

Należy również podkreślić, iż tematyka badawcza przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza KIEŁBICKIEGO jest żywa i aktualna. Została wybrana w sposób trafny i wpisuje się w pełni w zakres tematyczny dyscypliny Inżynieria mechaniczna. Spełnia zatem wymagania stawiane rozprawom doktorskim wnosząc w wielu elementach nowe treści poprzez osiągnięcie przyjętych celów pracy.

5. Podsumowanie

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Mateusza KIEŁBICKIEGO, pt. *„Metodyka projektowania i wytwarzania systemów mocowań przyrządów spawalniczych wytwarzanych technikami przyrostowymi dla przemysłu lotniczego”* spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

dr hab. inż. Bartosz Gapiński, prof. PP