

Gdańsk, 22.03.2024

Prof. dr hab. inż. Jerzy Łabanowski
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Instytut Technologii Maszyn i Materiałów
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
jerzy.labanowski@pg.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Steckowicza

**pt. "Development of a Repair of the Selected Gas Turbine Component by the Use of
Robotic Multi-Layer Wire Arc Cladding Process"**

zrealizowanej pod kierunkiem

promotora prof. dr hab. inż. Pawła Pyrzanowskiego

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej Pana prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika, z dnia 23.01.2024 r. nr RND IM 521.3.2024. Podstawę prawną wykonania recenzji stanowi Ustawa o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w zakresie Sztuki z dnia 14.03.2003r. (Dz. U. poz. 595 z 2003 r. z późniejszymi zmianami).

1. Zakres i aktualność tematu rozprawy

Przedmiotem badań i analiz w recenzowanej pracy doktorskiej są procesy wytwarzania przyrostowego elementów metalowych prowadzone za pomocą zrobotyzowanego napawania łukowego MIG/MAG. Techniki wytwarzania przyrostowego zwane również drukiem 3D znane są od ponad 30 lat. Dynamiczny rozwój tych technik pozwolił na odejście od etapu szybkiego prototypowania i przejście do etapu produkcji jednostkowej lub małoseryjnej elementów na potrzeby najbardziej zaawansowanych branż przemysłowych w tym motoryzacji, lotnictwa a także sektora kosmicznego. Technologie przyrostowe umożliwiają wytwarzanie elementów o bardzo skomplikowanych kształtach z zastosowaniem różnych materiałów metalicznych, polimerowych i ceramicznych. Korzyści stosowania technik przyrostowych związane są z redukcją czasu i kosztów wytwarzania, optymalizacją kształtów elementów oraz możliwością otrzymania wyrobów niemożliwych do wykonania stosując tradycyjne metody wytwarzania. Technologie przyrostowe stosowane

mogą być również do regeneracji części maszyn, które uległy erozji lub innym formom lokalnego niszczenia w czasie eksploatacji. Techniki 3D obejmują kilkadziesiąt metod formowania przedmiotów. Wytwarzanie elementów metalowych wymaga zastosowania specjalistycznych urządzeń i technologii, z których najczęściej stosowane jest topienie metalowych proszków za pomocą wiązki elektronów (EBM) oraz selektywne spiekanie lub selektywne stapianie proszków za pomocą wiązki laserowej (SLS/SLM).

Mgr inż. Piotr Steckowicz koncentruje swoje zainteresowania badawcze na znacznej tańszej w zastosowaniu i bardziej wydajnej metodzie przyrostowej prowadzonej za pomocą zrobotyzowanego napawania łukowego w osłonach gazowych. Do niedawna ta metoda nie była kojarzona z technikami przyrostowego drukowania 3D, głównie ze względu na trudności z precyzyjnym formowaniem elementów cienkościennych. Obecnie technologia ta zyskuje popularność zwłaszcza w zakresie regeneracji części maszyn, w których istnieje potrzeba odbudowania przyrostowego zużytych powierzchni, często o złożonych kształtach. O atrakcyjności metody drukowania 3D za pomocą metody MIG/MAG zdecydował rozwój technik spawania łukowego w zakresie precyzyjnego regulowania wkładu ciepła i transferu kropeł stopionego materiału dodatkowego oraz rozwój technik zrobotyzowanego prowadzenia palnika spawalniczego.

Zasadność stosowania metody zrobotyzowanego napawania łukowego MIG/MAG zwłaszcza w odniesieniu do regeneracji odpowiedzialnych elementów urządzeń energetycznych, czy stosowanych w przemyśle lotniczym i kosmicznym nie została jeszcze potwierdzona w praktyce. Z tego powodu uważam, że wybrana przez Doktoranta tematyka pracy jest aktualna, natomiast wskazany zakres badań i analiz trafny i w pełni uzasadniony.

Rozważane zagadnienia dotyczą implementacji nowoczesnej technologii w budowie maszyn i z tego powodu osiągnięcia naukowe wykazane w tej pracy przyczyniają się do rozwoju dyscypliny inżynieria mechaniczna.

2. Charakterystyka szczegółowa rozprawy doktorskiej

Rozprawa o objętości 105 stron, zawiera 41 rysunków i 9 tabel, wydana w formacie B5, napisana w języku angielskim. Opracowanie składa się z trzech zasadniczych części. Obejmują one: analizę stanu zagadnienia w świetle literatury, opis badań własnych wraz z analizą wyników i wnioskami oraz wykaz literatury.

Wykaz literatury zawiera 74 pozycje, w tym 14 odnośników do norm oraz adresów stron internetowych, artykuły z czasopism oraz inne opracowania. Zdecydowana większość

przywołanych artykułów z czasopism jest aktualna, wydana w ostatnich 10 latach. W wykazie został przytoczony jeden artykuł z czasopisma recenzowanego dotyczący zagadnień z zakresu pracy doktorskiej, w którym Doktorant jest współautorem.

Część studialna pracy (rozdział 1) jest integralnie związana z jej tematem i została oparta na przeglądzie pozycji literaturowych dotyczących wytwarzania przyrostowego elementów metalowych, nowoczesnych technik spawania łukowego z ograniczonym wkładem ciepła oraz budowy turbin gazowych. Przegląd literatury przedstawiony na 23 stronach formatu B5 nie można jednak uznać jako obszerny. Moim zdaniem Autor zbyt mało uwagi poświęcił doniesieniom literaturowym na temat postępu technik drukowania 3D części maszyn metodami spawania łukowego – metoda WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). W rozdziale 1.7 przedstawiono ogólne informacje dotyczące tej metody przedstawiając jej wady i zalety, bez szerszego odniesienia do sygnalizowanych problemów technologicznych, właściwości uzyskanych modeli/napoju i ich jakości, ograniczeń technologicznych i analizy kosztów.

W podsumowaniu tej części pracy Autor stwierdza, że zastosowanie zrobotyzowanego wielowarstwowego napawania łukowego GMAW może być konkurencyjną alternatywą w stosunku do tradycyjnych procesów napawania naprawczego, zwłaszcza w odniesieniu do elementów turbin gazowych. Ta nowoczesna metoda może zapewnić skuteczną regenerację elementów lub budowę części od podstaw przy mniejszych kosztach w stosunku do technik SLM lub SLS.

Autor nie przedstawia hipotezy naukowej pracy ograniczając się do wskazania głównego celu podjętych badań, jakim jest „zbadanie możliwości wykonania naprawy wybranych elementów konstrukcyjnych turbin gazowych za pomocą zrobotyzowanego wielowarstwowego napawania łukowego”. Cel pracy jest jasno i jednoznacznie sformułowany, natomiast uważam, że w pracy naukowej przyczyniającej się do rozwoju dyscypliny, hipoteza naukowa powinna zostać sformułowana.

Dla realizacji celów pracy Doktorant przyjął program składający się z 3 zasadniczych etapów. Etap I dotyczy badań wstępnych przyrostowego napawania łukowego na wybranych stopach żarowytrzymałych w celu ustalenia optymalnych parametrów napawania. W etapie II przeprowadza badania wstępne napawania przyrostowego na wybranym elemencie turbiny gazowej, w etapie III przedstawia technologię oraz wyniki napawania przyrostowego membrany uszczelniającej turbiny gazowej.

Na szczególną uwagę zasługuje realizacja etapu I pracy. Mgr inż. Piotr Steckowicz słusznie zauważa, że w normach europejskich (PN-EN ISO 15614) oraz amerykańskich nie wprowadzono dotychczas wytycznych kwalifikowania technologii spawania w odniesieniu do przyrostowych metod napawania łukowego. Normy nie precyzują sposobu wykonania napoin oraz kształtu próbek. W związku z tym Doktorant zaproponował procedurę badania i oceny elementów wytwarzanych metodami przyrostowego napawania łukowego. Zakłada ona przeprowadzenie badań w zakresie oceny dokładności i regularności powierzchni modelowanych obiektów, wielkości odkształceń, badań NDT obecności niezgodności spawalniczych takich jak pęknięcia, porowatości, braki przetopu, rozprysk oraz badań właściwości mechanicznych – głównie wytrzymałościowych w odniesieniu do wytwarzanych elementów turbin gazowych. Rozważa przeprowadzenie badań właściwości mechanicznych na próbkach płaskich ukierunkowanych wzdłuż osi napoin oraz na próbkach okrągłych ukierunkowanych prostopadle do osi napoin. Kryteria akceptacji przyjmuje zgodnie z wymaganiami normy AWS D17.1 - *Specification for fusion welding for aerospace applications*, która ujmuje procedurę kwalifikowania technologii spawania, oraz badania złączy spawanych łukowo w przemyśle lotniczym i kosmicznym. Badania napawania przyrostowego Doktorant przeprowadza na podłożu z żarowytrzymałych stopów niklu i kobaltu Hastelloy X i HS 188 stosowanych w turbinach gazowych. Warto podkreślić jest zastosowanie przez Doktoranta technologii CMT (Cold Metal Transfer) do formowania kolejnych ściegów oraz warstw napoin. Ta nowoczesna metoda spawania charakteryzuje się niską ilością wprowadzanego ciepła i dużą stabilnością jarzenia łuku, co może być pomocne w otrzymaniu dokładnych napoin o regularnej powierzchni. W efekcie przeprowadzonych badań Doktorant wskazał wpływ parametrów procesu spawania na geometrię napoin oraz ustalił optymalne parametry napawania. Użyte metody badawcze takie jak badania nieniszczące VT, PT, RT, badania metalograficzne makroskopowe, statyczne próby rozciągania można zaliczyć do tradycyjnych, lecz w tej pracy są wystarczające dla osiągnięcia założonych celów. Badania wielowarstwowych napoin (modeli) wykazały spełnienie założonych wymagań jakościowych oraz właściwości mechanicznych wyznaczonych zarówno na próbkach płaskich jak i okrągłych.

Bazując na wynikach badań wstępnych Doktorant przystąpił do opracowania technologii zrobotyzowanego napawania łukowego membrany uszczelniającej turbiny gazowej. Sam wybór elementu do oceny możliwości naprawy metodą przyrostowego napawania łukowego uważam za właściwy. Są to drogie elementy ulegające szybkiemu

zużyciu i nie łatwe do naprawy metodami spawalniczymi. Wybrana przez Autora membrana wykonana została z żeliwa sferoidalnego austenitycznego Ni-Rest D2B o ograniczonej spawalności. Opracowanie procedury naprawy takiego elementu za pomocą spawalniczych metod przyrostowych ułatwi wprowadzenie nowych technologii naprawy innych elementów turbin wykonanych z materiałów o podobnej lub lepszej spawalności.

W Etapie II pracy Autor przeprowadził badania mające na celu dobór materiału dodatkowego oraz parametrów napawania podłoża z żeliwa austenitycznego Ni-Rest D2B. Próby napawania wykonano na prostych odcinkach podłoża używając spoiw typu Ni-Rod 55, Ni-Rod 44, Inco 625 i 308LSi. Przeprowadzone badania nieniszczące napoin próbnych oraz ocena żaroodporności użytych materiałów pozwoliła Autorowi na wskazanie austenitycznego spoiwa 308LSi jako optymalnego do napawania naprawczego membran. Doktorant zakwestionował jednak użycie zaproponowanej wcześniej techniki CMT ze względu na małą rozplątność austenitycznego stopiwa 308LSi i kształtowanie ściegów o stożkowym przekroju o zbyt małej szerokości. W miejsce techniki CMT zaproponował spawanie pulsacyjne metodą MAG.

W etapie III badań Doktorant przeprowadził zrobotyzowane napawanie przyrostowe membrany uszczelniającej turbiny gazowej zgodnie z wcześniej opracowaną technologią. Istotne okazało się zaprogramowanie trajektorii ruchu palnika we współpracy z obrotnikiem w taki sposób, aby nakładać poszczególne ściegi w pozycji podłonej lub nabocznej, co sprzyja uzyskaniu poprawnej geometrii ściegów oraz minimalizuje liczbę niezgodności spawalniczych. Doktorant określił kolejność układania ściegów oraz ich liczbę w taki sposób, aby po napawaniu możliwe było przeprowadzenie obróbki skrawaniem i uzyskanie odpowiednich tolerancji wymiarowych. Podczas procesu napawania kontroli podlegał prąd spawania, zwłaszcza na początku i końcu układanych ściegów oraz temperatura międzywarstwowa. Napawanie przyrostowe zostało wykonane na trzech membranach. Rezultaty napawania oraz jakość napoin zostały zweryfikowane w badaniach nieniszczących wizualnych i penetracyjnych oraz na podstawie badań metalograficznych makroskopowych przekrojów.

W podsumowaniu Autor podkreśla konkurencyjność opracowanej technologii w stosunku do obecnie stosowanych metod wytwarzania przyrostowego takich jak SLS i SLM wskazując na znaczne oszczędności czasu i kosztów.

Wnioski sformułowane na podstawie otrzymanych wyników badań i ich dyskusji są przedstawione w sposób jasny i wskazują, że założone cele pracy zostały osiągnięte. Potwierdzeniem osiągnięcia użyteczności pracy są zamieszczone na stronach 103 i 104 pracy kopie dwóch patentów „Repair of gas turbine diaphragm”, US 11,148,235 B2 i US 11,813,708 B2 zarejestrowane w USA, w których Doktorant jest współautorem.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

W pracy można wyróżnić osiągnięcia naukowe i wdrożeniowe, do których zaliczam:

- Wykazanie możliwości dokonywania napraw wybranych elementów konstrukcyjnych turbin gazowych za pomocą zrobotyzowanego wielowarstwowego napawania łukowego w osłonach gazowych.
- Opracowanie etapów naprawczego napawania łukowego elementów z uwzględnieniem trajektorii ruchów robota, zmian parametrów napawania oraz bieżącej kontroli napoin w trakcie procesu.
- Zaproponowanie procedury kwalifikowania technologii łukowego napawania przyrostowego GMAW wraz ze wskazaniem warunków przygotowania próbek do badań.
- Określenie wpływu parametrów procesu zrobotyzowanego wielowarstwowego napawania łukowego GMAW na geometrię napoin/modeli.
- Wskazanie przydatności oraz ograniczeń stosowania niskoenergetycznych metod spawalniczych z kontrolą przenoszenia kropli ciekłego metalu z elektrody do spoiny (CMT, spawanie pulsacyjne GMAW) w zastosowaniu do przyrostowego napawania łukowego.

Oceniając pozytywnie rozprawę doktorską kieruję do Doktoranta pytania i uwagi do dyskusji.

- Proszę odnieść się do procedury wyboru materiału dodatkowego do napawania membrany uszczelniającej. Jakie były kryteria wyboru spoiwa 308LSi? Na rys 4.4 obrazującego odporność na utlenianie wysokotemperaturowe ten stop nie jest zaznaczony, natomiast podano informacje dla stopów 410 i 304, które nie są rozważane w pracy.

- Str. 44. - nie podano składów chemicznych badanych stopów Hastelloy X oraz HS 188.
- Proszę uzasadnić jednostkę ciśnienia – 1 micron, str 44, 4w. góra.
- Str. 47 – proszę uzasadnić dobór temperatury wyżarzania próbek ze stopów Hastelloy X oraz HS 188 w temperaturze 2150°F (nie podano w °C), czy jest to temperatura właściwa dla odprężania?
- Str. 50, rys. 3.5 – nie podano wpływu gazu osłonowego na geometrię napoin.
- Str. 66, tabela 4.2 – w tabeli podano błędne dane dotyczące: zawartości pierwiastków stopowych: w stopie Ni-Rod 55 jest 0,1% C, powinno być 1,2% C. Dla stopu Ni-Rod 44 jest 1,1%Mn, powinno być 11,0% Mn.
- W rozdziale 5 (str. 76) Autor stwierdza, że podczas napawania prąd spawania podlega zmianom na początku i końcu układanych ściegów. Nie jest jednak podana przyczyna takiego postępowania. Proszę o wyjaśnienie.
- Podobnie jak w poprzedniej uwadze nie jest jasne, czy podczas napawania membrany kontrolowana była temperatura podgrzania wstępnego i temperatura międzysciegowa? Jeżeli tak, to w jaki sposób i jakie były ustalone wartości tych temperatur.
- We wniosku nr 4 na str. 91 Autor odnosi się do naprężeń pozostających w napoinach wykonanych metodą napawania przyrostowego. Uważam, że jest to wniosek nieuzasadniony w tej pracy, ponieważ Autor nie badał poziomu naprężeń i nie opisał wpływu parametrów napawania na poziom tych naprężeń.

Uwagi szczegółowe:

- Str. 64, tabela 4.1 - błąd w opisie tabeli.
- Str. 65, rys.4.4 - wartość temperatury podana tylko w °F, brak w °C.
- Tabele 3.3-3.6 - brak jednostki MPa w kolumnie umownej granicy plastyczności.
- Str. 66, 3w. dół - przywołano rysunek 8c – brak w rozprawie.
- Str. 95 i 97 powtórzony nr rysunku 6.2.

Pod względem edytorskim rozprawę oceniam dobrze jednak mam kilka istotnych zastrzeżeń. Praca jest napisana w języku angielskim. Jako, że nie jestem ekspertem w zakresie języka angielskiego nie oceniam poprawności językowej tekstu, natomiast mogę stwierdzić, że użyte w pracy słownictwo techniczne jest poprawne.

Dokumentacja wyników badań przedstawiona w postaci tabel, rysunków i zdjęć jest przygotowana od strony merytorycznej poprawnie jednak niekiedy mało czytelna ze względu na zbyt drobny tekst opisów. Rysunki i tabele należałoby dostosować do formatu B5 wydania.

Zastrzeżenia budzi wykaz oznaczeń i skrótów przedstawiony na stronie 13. Jest tu zamieszczonych tylko 15 pozycji, podczas gdy w pracy Autor używa kilkadziesiąt różnych oznaczeń i skrótów. Co prawda zawsze są one opisane przy pierwszym cytowaniu, jednak jest to niewystarczające. Przykładem może być skrót UTP używany w rozdziale 4, tabela 4.3, który nie jest opisany w tekście.

Problematyczne jest też używanie dużych liter w tekście dla słów, które nie są nazwami własnymi, np. na str. 47, 4-10 w. od góry.

Doktorant również nie ustrzegł się pewnej ilości błędów, stylistycznych i interpunkcyjnych. Tego typu błędów, jako mniej ważnych, nie wykazałem w recenzji.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawioną rozprawę doktorską uważam za interesującą i wartościową. Pan mgr inż. Piotr Steckowicz zrealizował zadanie badawcze oraz wdrożeniowe będące przedmiotem rozprawy. Wykazał umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz opracowania i analizy uzyskanych wyników. Przedstawione w rozprawie wnioski są dobrze udokumentowane. Biorąc pod uwagę aktualność tematyki pracy w świetle prowadzonych na świecie badań, klarowne sformułowanie celów pracy oraz ich osiągnięcie na drodze dobrze zaplanowanych i przeprowadzonych badań pozytywnie oceniam przedstawioną rozprawę doktorską.

W podsumowaniu recenzji stwierdzam, że przedstawiona przez mgr inż. Piotra Steckowicza praca pt. "Development of a Repair of the Selected Gas Turbine Component by the Use of Robotic Multi-Layer Wire Arc Cladding Process" spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w zakresie Sztuki z dnia 14.03.2003 r. i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

