

Prof. dr hab. inż. Tomasz Węgrzyn  
Katedra Transportu Drogowego  
Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej  
Politechnika Śląska  
ul. Krasińskiego 8  
40-019 Katowice  
e-mail: Tomasz.Wegrzyn@polsl.pl

**RECENZJA**  
**rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Steckowicza**

**nt.**

„Development of a Repair of the Selected Gas Turbine Component by the Use of  
Robotic Multi-Layer Wire Arc Cladding Process”

**1. Podstawa opracowania**

Niniejsza recenzja opracowana została na podstawie informacji o powołaniu mnie na recenzenta przez Radę Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej, zawartej w piśmie od Pana Dziekana.

**2. Tytuł rozprawy doktorskiej - aktualność podjętego tematu**

Wytwarzanie addytywne (AM), czyli druk przestrzenny, to zbiór procesów nanoszenia kolejnych warstw w celu uzyskania założonego kształtu wyrobu. Wytwarzanie addytywne różnie klasyfikuje się ze względu na dobór materiałów produkcyjnych, dokładność wykonania, stan powierzchni i wymagania w zakresie obróbki wykończeniowej. Pierwsze metody druku 3D pojawiły się w czasach ekspansji technologii komputerowych w latach 80-tych i od tamtych czasów stale się zmieniają ze względu na rozwój nowych procesów wytwarzania. Istotną rolę w wytwarzaniu addytywnym odgrywają procesy spawalnicze, które nadają się do robotyzacji. Najważniejsze z nich to napawanie laserowe i wielowarstwowe napawanie w osłonie gazów ochronnych (Multi-Layer Wire Arc Cladding Process), które jest przedmiotem badań doktoranta. Do tej pory przeważnie próbowano technologii druku przestrzennego dla elementów wykonanych z różnych gatunków stali, głównie niestopowej i austenitycznej.

Doktorant prawidłowo opracował plan badań pozwalających na sprawdzenie przydatności procesu „Robotic Multi-Layer Wire Arc Cladding Process” do wytwarzania elementów turbin, wykonanych z nadstopów niklu i kobaltu oraz z żeliwa. Wykonał bardzo obszerne badania związane z oceną właściwości odporności korozyjnej i mechanicznych

wykonanych przestrzennie elementów turbin gazowych. Każda próba badawcza prowadząca do analizy struktury i właściwości różnych metalowych elementów wykonanych addytywnie jest zasadna.

Do tej pory nie opracowano rozwiązania technologiczno-materiałowego, które mogłoby być uniwersalnie zastosowane w technologii druku 3D procesami spawalniczymi.

Zaproponowana przez Doktoranta regeneracja i modyfikacja elementów turbin technologią druku 3D procesami spawalniczymi jest pomysłem autorskim i stanowi niezwykle ważny element nowości naukowej. Dążeniem Autora było sprawdzenie możliwości zastosowania technologii 3D w naprawach elementów turbin wykonanych ze stopu niklu, kobaltu oraz żeliwa i wdrożenie technologii dla regeneracji elementów żeliwnych. Dobór różnych gatunków metali i stopów do konkretnych zastosowań jest zagadnieniem ciągle zgłębianym przez naukowców, a tematyka jest niezwykle aktualna.

Podjęcie przez Autora badań nad efektami wpływu addytywnej technologii „wire additive arc repair” na własności użytkowe elementów turbin jest w pełni uzasadnione. Tematykę rozprawy i jej zakres należy ocenić jako niezwykle aktualne, stanowiące ważny krok na drodze projektowania i serwisowania różnego rodzaju elementów maszyn. Podjęty w rozprawie temat jest ważny i wnosi znaczący wkład w rozwój dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna”.

#### **Charakterystyka i ocena rozprawy - ocena metodyczna (ocena układu rozprawy doktorskiej, ocena zastosowanego piśmiennictwa)**

W rozprawie doktorskiej mgr inż. Piotr Steckowicz podjął próbę oceny wyrobów wytworzonych techniką addytywną „Robotic Multi-Layer Wire Arc Cladding Process” pod kątem przydatności i zastosowania ich w turbinach gazowych. Przewód doktorski jest realizowany w dyscyplinie „Inżynieria mechaniczna”. Układ rozprawy doktorskiej jest prawidłowy. Rozprawa podzielona jest na 6 rozdziałów, całość liczy 105 stron, zawiera spis literatury obejmujący 74 pozycje publikacyjnych. Przegląd piśmiennictwa jest wykonany bardzo starannie. Cytowane pozycje literaturowe są aktualne. Większość pozycji literaturowych stanowią najnowsze publikacje międzynarodowe, w tym międzynarodowe patenty Autora dysertacji. W rozprawie można zauważyć racjonalne zaplanowanie eksperymentu i prawidłowy dobór metod badawczych. Do oceny własności elementów turbin wykonanych technologią 3D zastosowano głównie statyczną próbę rozciągania i testy podatności na utlenianie oraz metody NDT.

Doktorant przygotował zestaw próbek do badań w oparciu o normy ISO oraz ASTM. Szczegółowo zaprezentował wykorzystaną w prowadzonym eksperymencie aparaturę badawczą. Wyniki zostały zinterpretowane prawidłowo. Układ rozprawy jest zgodny z zasadami realizacji doktoratów wdrożeniowych.

**W rozdziale 1.** pt. „Introduction” zawarto przegląd literaturowy spawalniczych metod łukowych ze szczególnym uwzględnieniem druku 3D z wykorzystaniem procesów

spawalniczych. Opisano działanie i budowę turbin gazowych wraz z informacją na temat stosowanych materiałów.

**W rozdziale 2.** pt. „Thesis and objectives” Autor zwrócił uwagę na potrzebę rozwoju technologii 3D z wykorzystaniem procesów spawalniczych. Po dokładnym przeglądzie literatury postawił tezę, która zakłada, że zastosowanie naprawy regeneracyjnej elementów turbin z wykorzystaniem wytwarzania addytywnego pozwoli na uzyskanie wyrobów o wymaganej jakości użytkowej.

**W rozdziale 3.** pt. „Materials screening” Autor opisał możliwość kwalifikacji spawalniczych napraw addytywnych. Doktorant przeprowadził dobór parametrów spawalniczych procesu „Robotic Multi-Layer Wire Arc Cladding Process”. Opracowany proces wykorzystał przy wykonywaniu próbek do testów. Materiałem rodzimym w procesie napawania był nadstop niklu Hasteloy X oraz nadstop kobaltu HS188. Drukowanie 3D było wykonane procesem MAG z wykorzystaniem drutów elektrodowych o zbliżonym składzie chemicznym do materiału rodzimego. Dodatkowo sprawdzano 3 różne osłonowe argonowe mieszanki gazowe z helem i ditlenkiem węgla. W badaniach stosowano dwie różne linie synergiczne (łącznie różne parametry spawania). Wydruk (stopiwo) został poddany badaniom NDT (VT oraz PT), które nie wykazały wad i niezgodności spawalniczych. Wytrzymałość wydruku na bazie niklu i na bazie kobaltu była na wymaganym poziomie, aczkolwiek niższa od materiału rodzimego.

**W rozdziale 4.** pt. „Gas Turbine Diaphragm repair - development” Doktorant przedstawił komponent turbiny gazowej, który został zakwalifikowany do naprawy addytywnej. W dysertacji przedstawiono charakterystykę i warunki pracy elementu turbiny (diaphragm), która jest wykonana z żeliwa. Wykonano kolejne próbki do badań nieniszczących oraz zgłady metalograficzne do obserwacji pod mikroskopem świetlnym. Drukowanie wykonano na podłożu z żeliwa i na podłożu ze stali niestopowej. Natomiast do drukowania 3D wytypowano austenityczny drut 308 LSi oraz druty elektrodowe na bazie niklu. Zaproponowana technologia addytywna ma na celu zastąpienie dotychczasowego konwencjonalnego napawania MAG z wykorzystaniem drutów na bazie niklu, które nie dają zadawalających efektów użytkowych. Wyniki badań NDT wydruków 3D wykonanych wszystkimi wariantami spawalniczymi (różne druty i podłoża) były bardzo zadawalające, nie stwierdzono żadnych wad i dyskwalifikujących niezgodności spawalniczych. Obserwacje makroskopowe zgładów wykazały prawidłowe wtopienie. Wykonano porównawczą analizę utleniania materiałów do zastosowania w procesie drukowania 3D. Analiza ta pozwoliła na wytypowanie najwłaściwszego materiału spośród porównywanych w tym rozdziale.

**W rozdziale 5** pt. „Diaphragm repair- implementation” Autor wykonał badania na obiekcie rzeczywistym, którym jest element żeliwny element turbiny (diaphragm), co wynika

z ustaleń doktoratu wdrożeniowego. Doktorant zaprogramował ścieżkę robota celem naprawy tego komponentu. Doktorant wskazał szczegółowo wszystkie etapy procesu regeneracji żeliwnego elementu turbiny. W pracy zostały wykonane badania NDT i makroskopowe potwierdzające tezę rozprawy.

**W rozdziale 6.** pt. „Summary and Conclusions” Autor podsumowuje prace i aktywności związane z wykorzystaniem spawalniczej technologii addytywnej. Podsumowując całość rozprawy, autor wskazał na możliwość wykonywania wydruków 3D wykorzystując różne materiały (stopy niklu, kobaltu, stal austenityczną) do napraw i modyfikacji elementów turbin wykonanych z różnych metali i stopów (żeliwo, nadstopy niklu, nadstopy kobaltu). Doktorant zaproponował działania przyszłościowe polegające na rozszerzeniu napraw i modyfikacji dla innych elementów maszyn.

### **3. Najważniejsze uwagi ogólne i szczegółowe**

Koncepcja badań doświadczalnych została sformułowana przez Doktoranta starannie i poprawnie. Realizację badań oceniam bardzo pozytywnie. Eksperymentalna część rozprawy jest przejrzysta i zawiera szereg wartościowych wyników i informacji. Doceniam trafnie przyjęty zakres metod badawczych oraz bardzo dużą ilość przeprowadzonych badań. Forma prezentowania wyników, profesjonalny sposób ich analizy oraz przedstawione wnioski świadczą o dojrzałości badawczej Doktoranta. Opracowane rozwiązanie jest innowacyjne na skalę światową o czym świadczą uzyskane przez Doktoranta trzy międzynarodowe patenty, zamieszczone w załącznikach do pracy.

W trakcie analizy rozprawy nasunęły mi się uwagi o charakterze ogólnym i kilka uwag szczegółowych nie mających wpływu na wysoką ocenę merytoryczną pracy.

Uwagi ogólne dotyczą uzupełnienia wybranych informacji zawartych w dysertacji i zostały przedstawione w formie pytań do Doktoranta:

1. W jakiej temperaturze pracuje żeliwny element turbiny (diaphragm), który jest przeznaczony do regeneracji 3D?
2. Dlaczego dotychczasowa technologia napawania MAG żeliwnego elementu turbiny (diaphragm), przy zastosowaniu drutów elektrodowych na bazie niklu nie daje dobrych efektów?
3. Dlaczego próbie utleniania nie były poddane materiały wykonane na bazie niklu?

Do uwag szczegółowych zaliczam:

1. Drobne niedociągnięcia edycyjne, np. brak podziałki lub nieczytelna podziałka na rysunkach, np. s.71 itp.
2. Dlaczego w badaniach skoncentrował się Pan na regeneracji głównie żeliwnej części turbiny, skoro uzyskał Pan doskonałe wyniki dla stopów niklu i stopów kobaltu, które świadczą, że z powodzeniem można wypróbować technologię 3D dla części niklowych i kobaltowych turbiny?

3. W jaki sposób przeprowadzono obserwacje struktury przedstawionej na rysunkach 4.8 i 5.8?

#### 4. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Steckowicza nt. „Development of a Repair of the Selected Gas Turbine Component by the Use of Robotic Multi-Layer Wire Arc Cladding Process” jest bardzo interesującą dysertacją o aktualnej tematyce. Praca doktorska reprezentuje dyscyplinę „Inżynieria mechaniczna”. Niepodważalnym walorem i oryginalnym osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie sposobu regeneracji elementów turbiny gazowej z wykorzystaniem spawalniczej technologii 3D. Podjęty w rozprawie temat jest ważny i wnosi istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej.

Doktorant wykazał się umiejętnością dobrego planowania i wykonywania badań oraz analizy merytorycznej uzyskanych wyników. Autor osiągnął cel postawiony w pracy, dochodząc do wyników mających znaczenie nie tylko poznawcze, ale przede wszystkim użyteczne. Całość recenzowanej rozprawy w pełni potwierdza wiedzę teoretyczną Doktoranta oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej. Doktorant wykazał się wiedzą z materiałoznawstwa, mechaniki, spawalnictwa, robotyzacji, którą doskonale wykorzystał do rozwiązywania problemu naukowego z dyscypliny „Inżynieria mechaniczna”.

**Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określone w wszystkie wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

Katowice, 14. II 2024 r



