

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Trajera pt. „Analiza wpływu parametrów obróbki ED na pokrycia aluminidkowe uzyskiwane różnymi metodami w otworach chłodzących części turbiny wysokiego ciśnienia”. Rozprawa przygotowana w ramach realizacji programu „Doktorat Wdrożeniowy” na podstawie umowy nr 0050/DW/2918/02

Recenzja wykonana została na zlecenie Przewodniczącej Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej Prof. dr hab. inż. Małgorzaty Lewandowskiej z dnia 24.04.2023 r.

1. Charakterystyka ogólna rozprawy

Dynamiczny rozwój przemysłu lotniczego w Polsce w ostatnich latach ukierunkowany jest między innymi na produkcję zaawansowanych podzespołów silników lotniczych, a w szczególności – elementów części gorącej turbiny. Do zakładów wytwarzających tego rodzaju komponenty zaliczyć można m.in. Avio Polska, Pratt Whitney Rzeszów, MTU Aero Engines Polska oraz Safran Aircraft Engines, a także remontujące silniki firmy EME Aero oraz Wojskowe Zakłady Lotnicze nr 2. Stąd przekazana do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Trajera pt. *„Analiza wpływu parametrów obróbki EDM na pokrycia aluminidkowe uzyskiwane różnymi metodami w otworach chłodzących części turbiny wysokiego ciśnienia”* wpisuje się w tą tematykę. Zrealizowane prace badawczo-rozwojowe opisane w rozprawie doktorskiej dotyczą nowej generacji turbowałowych silników charakteryzujących się większą sprawnością uzyskiwaną m.in. dzięki zastosowaniu łopatek turbiny z otworami chłodzącymi poddawanych aluminiowaniu. Zagadnienie to nie było podejmowane w naszym kraju – w szczególności w przypadku silników turbowałowych, a poza publikacjami Doktoranta prace w tym zakresie w Polsce nie są znane. Uważam więc że przyjęta tematyka jest nowa i stanowi istotny wkład w rozwój inżynierii materiałowej

w naszym kraju. Zakres zagadnień poruszonych w pracy dotyczy zarówno analizy czynników technologicznych samego procesu elektrodrążenia jak i ich wpływu na proces tworzenia się w powstałych otworach dyfuzyjnej warstwy aluminidkowej stanowiącej ochronę przede wszystkim przed utlenianiem wysokotemperaturowym. Co istotne, procesy aluminowania prowadzono w warunkach przemysłowych, co doskonale wpisuje się w główny cel programu „Doktorat wdrożeniowy”. W analizie wyników badań w bardzo dużym stopniu stosowano narzędzia informatyczne w tym zaawansowane systemy bazodanowe ukierunkowane na Przemysł 4.0.

Ocenianą rozprawę można zaliczyć do gatunku typowych jeżeli chodzi o standardy prac doktorskich. Została przedstawiona w formie monografii. Układ rozprawy liczącej 169 stron należy również zaliczyć do klasycznych. Rozprawa została podzielona na przegląd literatury wraz z jego analizą, cel i zakres pracy badawczej, dwa rozdziały zawierające wyniki badań własnych wraz z metodyką dotyczące zagadnień drążenia elektroerozyjnego oraz aluminowania, podsumowanie wyników badań oraz kierunek dalszych prac badawczych i bibliografię. Treść rozprawy została zilustrowana aż 160 rysunkami. Od strony edytorskiej praca została poprawnie przygotowana, choć znaleźć w niej można pewne błędy, które jednak nie wpływają na jej ogólnie pozytywną ocenę.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

W recenzowanej rozprawie doktorskiej przegląd literatury podzielony został na 4 zasadnicze zagadnienia dotyczące: rozwoju silników odrzutowych, analizę obróbki elektroerozyjnej, mechanizmów degradacji materiałów na łopatki turbin, charakterystykę powłok aluminidkowych uwzględniającą ich odporność korozyjną. Został on przygotowany na podstawie analizy 94 pozycji literaturowych. Przegląd rozwoju silników odrzutowych dotyczy rozwoju ich konstrukcji od pierwszych silników brytyjskich i niemieckich aż do konstrukcji współczesnych. W podrozdziale tym autor opisał zasadę działania silnika odrzutowego oraz metody zwiększania ich sprawności wynikające z ewolucji ich konstrukcji. Za istotny element uznać należy opisaną w syntetyczny sposób drogę rozwoju nadstopów niklu. Uwzględniono również rozwój konstrukcji układów chłodzenia łopatek turbin ze szczególnych uwzględnieniem wytwarzania otworów chłodzących których metody wytwarzania ujęto w kolejnym rozdziale 3.2. Autor przedstawił w nim dość szczegółową analizę tematu obróbki elektroerozyjnej. Ujęto w nim opis podstawowych parametrów oraz sam przebieg procesu obróbki. Omówiono budowę i rozwój urządzeń stosowanych do

obróbki elektroerozyjnej. Dokonano również analizy metody drążenia elektroerozyjnego (EDD- Electro Discharge Drilling/FHD – Fast Hole Drilling) wprowadzonej w technice lotniczej do wykonywania otworów chłodzących, a w szczególności – zalety użycia elektrod rotujących. Poruszono także ważny – z punktu widzenia technologicznego – problem detekcji przebicia. Za bardzo istotny uważam poruszony w tym rozdziale przez autora aspekt zależności pomiędzy parametrami procesu drążenia, a strukturą tzw. warstwy zmienionej i tworzeniem się mikropęknięć. Pozycje literaturowe przytoczone i analizowane przez Autora pozwoliły na wskazanie najważniejszych z nich. Najobszerniejszy fragment rozdziału 3.2 poświęcony został drążeniu elektroerozyjnemu. Szczegółowa analiza literatury dotyczyła takich zagadnień jak: rodzaj materiału elektrody, jej kształt i długość, płukanie obszaru roboczego. Zdefiniowano podstawowe wskaźniki definiujące przebieg procesu drążenia takie jak: MRR- Material Removal Rate – prędkość usuwania materiału, RLT – Recast Layer Thickness – grubość warstwy przetopionej, RL – Recast Layer – warstwa przetopiona TWR - Tool Wear Ratio – współczynniki zużycia narzędzia. W tej części dokonano bardzo wnikliwej analizy dostępnych danych literaturowych dotyczących wpływu czynników technologicznych na wyżej wymienione wskaźniki. Nie pominięto również ich wpływu na strukturę materiału wokół otworu czy chropowatości powierzchni. Opisano również metody detekcji przebicia. W podrozdziale 3.2.2 autor w syntetyczny sposób scharakteryzował metodę frezowania elektroerozyjnego.

Rozdział 3.3. porusza tematykę ochrony powierzchni łopatek turbin przed czynnikami korozyjnymi. Zarysowano w nim warunki eksploatacyjne nadstopów niklu oraz podstawowe mechanizmy ich korozji – utleniania oraz korozji siarkowo-tlenowej (tzw. hot corrosion). Temu ostatniemu z zagadnień mgr inż. Marcin Trajer poświęcił więcej uwagi i scharakteryzował zarówno typ I jak i II hot corrosion. Na podstawie analizy danych literaturowych słusznie wskazał, że najczęściej stosowanym sposobem ochrony łopatek turbin jest wytworzenie na ich podłożu warstwy aluminiowej w procesach nisko lub wysokoaktywnych. W rozdziale 3.3.1 opisano mechanizmy tworzenia się warstwy aluminiowej w procesach gazowych. Wskazano również czynniki determinujące kinetykę procesu konstituowania się warstwy. W mojej ocenie nie poruszono w nim jednak aspektów dotyczących tworzenia się warstwy w wewnętrznych kanałach chłodzących łopatek co jest związane z tematyką pracy (m.in. Smith A.B., Kempster A., Smith J „Vapour aluminate coating of internal cooling channels, in turbine blades and vanes”, Surface and Coatings Technology, Vol 12-121, str. 112-117, 1999r) a także roli innych aktywatorów halogenkowych m.in. AlF_3 powszechnie stosowanego w praktyce przemysłowej. W rozdziale

3.3.2 krótko scharakteryzowano proces aluminowania metodą chemicznego osadzania z fazy gazowej - CVD.

W rozdziale 3.4 dokonano charakterystyki odporności korozyjnej warstw aluminidkowych. Analiza wybranych pozycji literaturowych pozwoliła na prawidłowe wskazanie przez Autora czynników wpływających na zwiększenie odporności na utlenianie warstw aluminidkowych takich jak czystość warstwy i wpływ atmosfery ochronnej. Doktorant nie zapomniał również wskazać na możliwość zwiększenia odporności korozyjnej warstw aluminidkowych przez wprowadzenie pierwiastków modyfikujących m.in. Pt, Hf, Y.

Rozdział 4 stanowią wnioski z analizy literaturowej. W zakresie zagadnienia obróbki elektroerozyjnej Doktorant wskazał m.in. na brak kompleksowych analiz, które ujmują wszystkie znaczące zmienne procesu, trudności w zakresie modelowania tego wieloczynnikowego procesu i wpływu parametrów elektrody na proces drążenia. Uznać należy że wnioski wyciągnięte z przeglądu piśmiennictwa w zakresie elektrodrążenia są prawidłowe. Zgadzam się również z wnioskami sformułowanymi przez Autora dotyczącymi korozji wysokotemperaturowej oraz warstw dyfuzyjnych. Wskazano w nich podstawowy mechanizm ochrony powierzchni łopatek chronionych warstwą aluminidkową, metody jej wytwarzania oraz sposoby modyfikacji. Wnioski z przeprowadzonej analizy literaturowej pozwoliły na wskazanie w rozdziale 5 głównych celów pracy badawczej zdefiniowanych przez Autora:

1. „Opracowania parametrów wykonywania otworów chłodzących, które zapewniają stabilne działanie przy jednoczesnej wysokiej powtarzalności geometrycznej procesu.
2. Wpływ modyfikacji powierzchni spowodowany obróbką elektroerozyjną na trwałość powłok aluminidkowych przy zastosowaniu różnych technik wytwarzania powłok (CVD, VPA).
3. Modyfikacja procesu elektrodrążenia wpływająca pozytywnie na powłokę antykorozyjną na obszarze objętym obróbką iskrową.”

W mojej ocenie zostały one prawidłowo sformułowane. Jedyna moja uwaga dotyczy terminu „wysokiej powtarzalności geometrycznej procesu” który uważam za nieprecyzyjny. Bardziej właściwe byłoby określenie „przy zachowaniu wysokiej powtarzalności wymiarowej”. W rozdziale 5.1 przedstawiono zakres prac realizowanych w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” którego efektem jest niniejsza rozprawa doktorska. Prace badawczo-rozwojowe dotyczyły nowej wersji silnika turbośmigłowego Catalyst do którego – ze względu na ograniczenia tzw. kontroli eksportu – konieczne było opracowanie m.in. nowej technologii elektrodrążenia. W uzupełnieniu należy podkreślić, że rodzina tych silników

cechuje się – właśnie dzięki zastosowaniu otworów chłodzących – zwiększoną temperaturą pracy o ok. 150°C w porównaniu z wcześniejszymi konstrukcjami. Realizowane w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej badania były bardzo złożone, a ilość uwzględnianych zmiennych oraz wyników prac eksperymentalnych – bardzo duża. Za istotny wkład w realizowane badania uważam wprowadzenie autorskich rozwiązań w zakresie Przemysłu 4.0 a w szczególności systemów bazodanowych np. CoolBox. Zostały one opisane w rozdziale 5.1.1. Opis metodologii zastosowania opracowanego i wykorzystywanego oprogramowania jest przejrzysty. Za bardzo istotne uważam kompleksowość opracowanego oprogramowania pozwalającego nawet na generowanie programów CNC do procesów elektrodrążenia. *Wyjaśnienia jednak wymagają zastosowane moduły CoolBox – czy stanowią one opracowane od podstaw oprogramowanie GE czy też stanowią środowisko do przygotowania odpowiedniego systemu analizy danych?*

Wyniki badań własnych dotyczących technologii drążenia elektroerozyjnego Autor zawarł w obszernym rozdziale 6. Ujęto w nim podstawowe wymagania wobec opracowywanej technologii, zdefiniowano parametry procesu poddawane analizie (m.in. napięcie, natężenie, czas włączania i płukania, pojemność, wydatek wody, posuw i prędkość obrotową elektrody). Podrozdział 6.1 koncentruje się na materiale i metodzie zrealizowanych badań. Zawarto w nim najważniejsze dane dotyczące konstrukcji i parametrów drążarki, zastosowanej metodyki skanowania powierzchni wykonanych otworów. Zestawiono także podstawowe dane o materiale podłoża oraz materiałów użytych na elektrody. Ze względu na bardzo dużą ilość zebranych danych dotyczących procesów drążenia elektroerozyjnego, które zebrano w trakcie prowadzonych badań Autor dokonał systematycznej analizy poszczególnych czynników technologicznych mających wpływ na proces wykonywania otworów. W mojej ocenie pozwala to łatwą i przejrzystą analizę tej części rozprawy. Wskazuje to na opanowanie przez mgr inż. Marcina Trajera warsztatu naukowego oraz umiejętności usystematyzowania i analizy ogromnej ilości uzyskanych danych z wykorzystaniem metod komputerowych.

W rozdziale 6.3 szczegółowej analizie poddano wpływ płukania obszaru roboczego. W pierwszym etapie zdefiniowano – na podstawie zebranych danych – procesy wykazujące niestabilność przepływu. Dalsze szczegółowe badania ukierunkowano na uzyskanie dodatkowych zmiennych charakteryzujących ten czynnik: wprowadzenie dodatkowego, precyzyjnego pomiaru przepływu wody za pomocą mikro przepływomierza, badania struktury i przekroju stosowanych elektrod. Uzyskane wyniki uzupełniły opracowany przez Autora model za pomocą oprogramowania Ansys Fluent. Podkreślić należy, że był on stopniowo

rozwijany i uzupełniany o nowe parametry. Początkowo dokonano symulacji elektrody swobodnej, natomiast w kolejnym kroku modelowano zagłębiania się elektrody w podłoże w którym wprowadzano dodatkowe zmienne np. wartość chropowatości ścianek. W rozdziale tym dokonano analizy wyników symulacji z uwzględnieniem zjawisk związanych z mechaniką płynów. Ostatnią część tego podrozdziału stanowi analiza statystyczna wyników prób drążenia m.in. z uwzględnieniem zmiany ciśnienia. W mojej ocenie uzyskane przez Autora wyniki są istotne jednak nie przedstawiono ogólnych wniosków końcowych dotyczących roli wartości przepływu wody na proces elektrodrążenia. Kolejnym analizowanym czynnikiem był posuw elektrody. Badania wstępne ograniczono dla jednego rodzaju elektrody, materiału podłoża oraz parametrów bazowych, a w dalszym etapie zakres zmiennych poszerzono. Za istotne w tym rozdziale uznać należy zdefiniowanie kryteriów oceny prowadzonego procesu. W opracowanej metodologii Autor wykazał, że kryterium to powinien stanowić czas najkrótszego drążenia, a nie przyjęte wcześniej – współczynniki posuwu i wskaźnik napięcia V_r . W konsekwencji prowadzonych analiz opracowano model drążenia ze zmienną szybkością posuwu elektrody zależnym od jej długości. Przeprowadzone badania pozwoliły na poprawę stabilności warunków procesu drążenia elektroerozyjnego. Kolejnym czynnikiem analizowanym w rozprawie był wpływ obciążenia i długości faz cyklu. Syntetycznie opisano w nim wpływ wymienionych czynników m.in. na średnicę, chropowatość wewnętrzną otworu, a także powstanie drobin wokół niego. Autor wskazał, że największą stabilność uzyskano dla 50% obciążenia cyklu. Za bardzo istotny uważam poruszony w rozdziale 6.6. wpływ materiału obrabianego. Eksperymentalne drążenia wykonano dla takich samych parametrów procesu na 5 wybranych podłożach: węgliku krzemu typu VHM, nadstopie niklu Inconel 718, stali niestopowej gatunku AiSi 1045, miedzi CuCr1Cr oraz stopie aluminium gatunku 2017A. Przedstawiony plan eksperymentu oraz przeprowadzona analiza statystyczna wartości uzyskanych dla przyjętych parametrów (prędkość usuwania materiału, zużycia elektrody i wskaźnika smukłości) jest poprawna. Ich cenne uzupełnienie stanowią przeprowadzone badania mikroskopowe oraz skanowanie powierzchni. Zgodzić się należy z przedstawioną opinią o konieczności dalszych badań nad mechanizmem powstawania stożka na dnie otworów w materiałach najtrudniej obrabialnych (węglik wolframu oraz stop miedzi). W podrozdziale 6.7 analizie poddano wpływ elementów pojemnościowych na proces drążenia elektroerozyjnego, a w szczególności na zużycie elektrody oraz czas drążenia. Jak wskazał Autor czynnik ten nie jest analizowany w dostępnych danych literaturowych. Poza aspektami materiałowymi i technologicznymi w ocenianej rozprawie Autor uwzględnił analizę elektrod stosowanych w procesie drążenia

elektroerozyjnego w tym samych producentów. Na podstawie wykonanych procesów doświadczalnych wskazał na wytwórcę elektrod zapewniających – najważniejszą cechę procesu technologicznego – stabilność oraz powtarzalność wymiarową otworów. Bardzo istotne wyniki prac nad wytwarzaniem otworów kształtowych zawarte zostały w rozdziale 6.9. W zrealizowanym planie badań uwzględniono dane wynikające z przeprowadzonej analizy literaturowej np. technologii wierszowania, a następnie zdefiniowano kształt i wymiary wyrobu. W mojej ocenie duże znaczenie mają wyniki dotyczące ścieżki elektrody w trakcie wykonywania otworu kształtowego. Autor umiejętnie wykorzystał metodę skanowania otworu, co pozwoliło na wybranie najlepszego algorytmu ruchu elektrody. Wyniki te mają bardzo duże znaczenie praktyczne – otwory tego rodzaju są stosowane w silnikach turbośmigłowych rodziny Catalyst. Dość ogólnikowe – w mojej ocenie – są wnioski sformułowane w podrozdziale 6.10. Stanowią podsumowanie badań jednak *Autor nie wskazał które z parametrów procesu drążenia elektroerozyjnego należy uznać za najistotniejsze. Wymaga to jednoznacznego ich wskazania.*

Z punktu widzenia naukowego i technologicznego za bardzo cenne uważam wyniki zawarte w rozdziale 7 dotyczącym badań warstw aluminidkowych. Stanowią one jedno z pierwszych opracowań dotyczących tworzenia się warstwy aluminidkowej w otworach chłodzących łopatek turbin w Polsce. Doktorant umiejętnie dobrał dwie stosowane obecnie metody pozwalające na uzyskanie warstwy aluminidkowej w kanałach i otworach łopatek turbin. Pierwszą z nich stanowi metoda gazowa bezkontaktowa (VPA, Vapour Phase Aluminizing), stosowana powszechnie w krajowym przemyśle lotniczym m.in. przez firmy Pratt Whitney, MTU oraz Avio Polska. Jako drugą metodę wybrano chemiczne osadzanie z fazy gazowej (CVD) dla której próbki wykonano w Laboratorium Badań Materiałów dla Przemysłu Lotniczego Politechniki Rzeszowskiej. Podkreślić należy że oba procesy zrealizowano w warunkach przemysłowych, co doskonale wpisuje się w koncepcję doktoratu wdrożeniowego. O ile przyjęta metodyka badawcza jest prawidłowa to sposób opisu aluminowania metodą gazową w rozdziale „Materiały i metody” jest dość chaotyczny z licznymi nieścisłościami terminologicznymi. Z kolei opis metody CVD jest zbyt krótki i ogólnikowy. Opis pozostałych aspektów metodyki badawczej np. próby utleniania nie budzi natomiast większych zastrzeżeń. Autor przeprowadził badania wstępne z użyciem próbki z wydrążonymi otworami poddanej aluminowaniu gazowemu VPA (stanowiącą standard przemysłowy), której połowę poddano próbie utleniania izotermicznego w typowych warunkach – temperatura 1100°C i czas 23h. Przyjęta metodyka wyboru miejsc badań mikrostruktury warstwy aluminidkowej jest poprawna. *Nasuwa się jednak pytanie czy wyniki*

te są zgodne z kryteriami dla warstw aluminidkowych wynikających z norm lotniczych lub zakładowych? Wymaga to wyjaśnienia. Moja uwaga dotyczy jednak sposobu analizy składu chemicznego metodą EDS. Brak informacji o sposobie wyznaczania zawartości tlenu i węgla w analizowanych mikroobszarach. Interpretacja wyników – pojawienie się tlenku aluminium – jest prawidłowa i potwierdzona analizą składu fazowego. Jego obecność nie została wprost opisana – a należy ją łączyć z m.in. tworzeniem się warstewki tlenków TGO. Brakuje też w wyjaśnieniu przyczyny pojawienia się na dyfraktogramach fazy $NiAl_3$ która jest typowa dla procesu wysokoaktywnego, w którym dominuje odrdzeniowa dyfuzja aluminium. Z drugiej strony przedstawione mikrostruktury są charakterystyczne dla mechanizmu wzrostu warstwy aluminidkowej w wyniku odrdzeniowej dyfuzji niklu np. powstanie warstwy addytywnej (HTLA). W procesie stosowano też granule Al-Cr o małej zawartości aluminium (30 % mas). Wyniki badań wstępnych pozwoliły w mojej ocenie na poprawne przygotowanie planu badań zasadniczych. Analizując pytania postawione przez Autora na początku rozdziału słusznie przyjął on zawartość aluminium zarówno jako wskaźnik jakości warstwy jak i miary jej stopnia degradacji. W przypadku próbek z otworami nie jest możliwe przyjęcie innych kryteriów np. zmian masy co zostało uzasadnione przez Autora. Opis wyników próby utleniania został poparta odpowiednio zestawionymi zdjęciami mikrostruktury i wynikami analizy EDS zgodnie z przyjętą metodyką. We wstępnej analizie uzyskanych w tym rozdziale wyników Autor prawidłowo wykazał zależność pomiędzy energią drażenia (mocą), a odpornością na utlenianie. Zaobserwował również wpływ metody aluminiowania na grubość uzyskiwanej warstwy oraz głębokość jej osadzania się w otworze. Z wnioskami przedstawionymi w podsumowaniu badania głównego (rozdz. 8.2) można się zasadniczo zgodzić – zastosowanie metody CVD pozwala na zwiększenie głębokości osadzania warstwy aluminidkowej w otworze, jak i zwiększeniu jej odporności na utlenianie. W mojej ocenie niepoprawne jest wyjaśnienie przedstawione przez Doktoranta. Na podstawie danych literaturowych m.in. prowadzonych w firmie Howmet i badań własnych zastosowany proces CVD charakteryzuje się mniejszą aktywnością od metody gazowej. W obu przypadkach konstytuowanie się warstwy aluminidkowej następuje w wyniku dominującej odrdzeniowej dyfuzji niklu (tzw. proces wysokotemperaturowy niskoaktywny, HTLA). Większy stopień wnikania aluminium do wnętrza kanału chłodzącego wynika z obecności czysto gazowego charakteru procesu. Drugą przyczyną może być opisany w części literaturowej przez Autora rozprawy wpływ wodoru pozwalający na uzyskanie warstwy o większej czystości i usunięciu m.in. siarki ograniczającej żaroodporność. Analiza wyników w zakresie wpływu energii samego drażenia na właściwości warstw aluminidkowych nie budzi z mojej strony zastrzeżeń.

Podsumowanie prac badawczych w rozdziale 9 wskazuje na bardzo dużą ilość przeprowadzonych badań eksperymentalnych (200 testów, 30 tys. otworów). W mojej opinii jednak analiza wyników dotycząca zarówno wyników badań nad procesem drażenia elektroerozyjnego jak również aluminiowania są dość ogólnikowe. Z drugiej strony zawarte w ostatnim rozdziale kierunki dalszych prac badawczych są słuszne i należy mieć nadzieję że będą kontynuowane. *Doskonałym podsumowaniem byłoby jednak wskazanie w jaki zakresie wyniki przedstawionych w niniejszej rozprawie wyniki badań będą wdrożone w firmie General Electric?*

3. Wniosek końcowy

Przekazaną do recenzji rozprawę doktorską mgr inż. Marcina Trajera oceniam bardzo pozytywnie. Tematyka w niej przedstawiona wpisuje się w zakres dyscypliny inżynieria materiałowa. Przedstawione wyniki badań eksperymentalnych uważam za oryginalne w aspekcie naukowym. Cechuje je ogromny potencjał aplikacyjny pozwalający na szybkie wprowadzenie do praktyki przemysłowej zgodnie z założeniami programu doktoratu wdrożeniowego. Przyjęta tematyka stanowi nowość na skalę krajową jak również jedno z niewielu przykładów tak systematycznego i kompleksowego zanalizowania wpływu procesu drażenia elektroerozyjnego na warstwy aluminiowe w krytycznych miejscach łopatki turbiny silnika lotniczego. Postawione przez Doktoranta cele zostały osiągnięte i stanowią podstawę do wprowadzenia do produkcji technologii aluminiowania łopatek z otworami chłodzącymi wykonanymi w procesie EDM.

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa doktorska „Analiza wpływu parametrów obróbki EDM na pokrycia aluminiowe uzyskiwane różnymi metodami w otworach chłodzących części turbiny wysokiego ciśnienia” spełnia wymagania ustawy z dnia 20 lipca 2018 – prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z r. 2018 poz 1668 z późn. Zm.) i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Marcina Trajera do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

marek gońca