

Dr hab. inż. Bogusław Mendala prof. PŚ
Katedra Technologii Materiałowych
Wydział Inżynierii Materiałowej
Politechnika Śląska
ul. Krasińskiego 8
40-019 Katowice

Katowice, 30.06.2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej
mgra inż. Marcina TRAJERA

pt.: „Analiza wpływu parametrów obróbki EDM na pokrycia aluminidkowe uzyskiwane różnymi metodami w otworach chłodzących części turbiny wysokiego ciśnienia”, wykonanej pod opieką dra hab. inż. Roberta Sobieckiego, prof. PW, opracowana na podstawie pisma Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Małgorzaty Lewandowskiej z dnia 27.04.2023 r.

Praca doktorska została zrealizowana w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” na podstawie umowy z MNISW 0050/DW/2018/02

Wybór tematyki rozprawy

Elementy nowoczesnych turbin silników lotniczych pracują w skrajnie wysokiej temperaturze, która warunkuje osiągnięcie jak najwyższej sprawności. Założenie to stało się powodem rozwoju nowoczesnych stopów, tzw. superstopów, technologii wytwarzania specjalnych warstw żaroodpornych i powłok ochronnych. Postawiło również przed konstruktorami zadanie opracowania specjalnych systemów chłodzenia komponentów, co wiąże się z opanowaniem zagadnień związanych z wykonywaniem specjalnych otworów chłodzących, pozwalających na wytworzenie filmu powietrznego, chroniącego powierzchnię np. łopatek roboczych w silnikach turbinowych. Niniejsza praca dotyczy opracowania podstaw technologicznych wykonywania otworów chłodzących, o małych średnicach, przy wykorzystaniu procesu elektrodrażenia prowadzonego z zastosowaniem elektrod o średnicach wynoszących ok. 0,2 mm. **Tematyka podjęta przez Doktoranta, jest bezpośrednio związana z rozwojem technologii elementów chłodzonych nowego silnika turbośmigłowego Catalyst, którego zaprojektowanie i rozwój firma General Electric Aerospace powierzyła firmom z Europy. Mgr inż. Marcin Trajer jest członkiem zespołu, który jako pracownik General Electric Company Polska, Laboratorium**

Zaawansowanych Technologii Produkcyjnych, prowadził prace badawczo-rozwojowe dotyczące opracowania procesu produkcyjnego otworów chłodzących w łopatkach, aparatach kierujących i bandażach silnika Catalyst.

Przy założeniu, że podjęte prace mają skoncentrować się na opracowaniu kompleksowego procesu produkcyjno-inspekcyjnego, zadanie to należy uznać za nadzwyczaj ambitne, tym bardziej, że wykorzystywane urządzenie – elektrodrażarka nie było wyposażone w biblioteki parametrów obróbczych i ścieżek przemieszczania się narzędzia. Doktorant nie miał też wcześniejszych doświadczeń zawodowych z wykorzystywaniem narzędzi o zdecydowanie mniejszej średnicy, których to zastosowanie jest pilnie strzeżone przez firmy i niejednokrotnie objęte tzw. kontrolą eksportu. Zakres prac rozwojowych i badań, jaki postawił przed sobą mgr inż. Marcin Trajer obejmował: zbudowanie systemu akwizycji danych i kontroli procesów produkcyjnych, które pozwolą na opracowanie technologii drażenia elektroerozyjnego otworów chłodzących i zbadanie jak technologia ta wpływa na właściwości ochronnych warstw aluminidkowych.

Uważam, że podjęte w rozprawie przez mgra inż. Marcina Trajera zagadnienia, są bardzo aktualne, nowatorskie dla rodzimego przemysłu oraz istotne z punktu widzenia dyscypliny inżynierii materiałowej, a zwłaszcza inżynierii powierzchni.

Szczegółowa ocena rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Marcina Trajera pt. **”Analiza wpływu parametrów obróbki EDM na pokrycia aluminidkowe uzyskiwane różnymi metodami w otworach chłodzących części turbiny wysokiego ciśnienia”** została wydana w postaci książkowej i jest opatrzona logo Politechniki Warszawskiej (Warsaw University of Technology), pod kierownictwem promotora dra hab. inż. Jerzego Roberta Sobieckiego, prof. PW i przy udziale dr inż. Magdaleny Machno, jako promotora pomocniczego. Rozprawa została opracowana w języku polskim, napisana na 169 stronach, zawiera 160 rysunków i 16 tabel. Na stronie 70 zostały zebrane dane w postaci tabelarycznej, dotyczące grubości warstw aluminidkowych wytworzonych na stopach Inconel, które oznaczono jako Rysunek 3-68. Zdaniem recenzenta, konsekwentnie powinna to być tabela, więc rzeczywista liczba tabel zwiększy się o jedną, natomiast zmniejszy się liczba rysunków zamieszczonych w pracy.

Rozprawę doktorską kończy spis publikacji autorskich – pkt. 11, zawierający 3 pozycje, natomiast w punkcie 12 zebrano wykorzystane w pracy materiały źródłowe – Literaturę, zawierającą 94 pozycje, tematycznie związane z rozprawą.

Opracowanie mgr inż. Marcina Trajera rozpoczyna streszczenie w języku polskim i angielskim oraz dodatkowo podano słowa kluczowe, co znakomicie wprowadza czytelnika w tematykę pracy. Treść rozprawy doktorskiej została podzielona na 13 rozdziałów głównych, z których pierwszym jest spis skrótów i oznaczeń (definicji nie zawiera), natomiast ostatnim spis rysunków. Spis treści obejmuje przegląd literatury dotyczący technologii elektrodrażenia i warstw ochronnych stosowanych na elementach silników lotniczych, cel i zakres badań, opracowanie technologii drażenia elektroerozyjnego, badania powłok aluminiowych, które podzielono i określono jako badania wstępne i badania główne, podsumowano w rozdziale 9 - „podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych”. Pracę kończy rozdział 10 zatytułowany „kontynuacja prac nad technologiami”.

Część literaturowa pracy, rozdział 3, została podzielona na cztery podrozdziały. W pierwszym z nich Autor dokonał syntetycznego opisu rozwoju silników odrzutowych, który odbył się dzięki zastosowaniu sprężarek o budowie promieniowej i osiowej, co pozwoliło na uzyskanie znacznego wzrostu mocy – ciągu, a jednocześnie umożliwiło zmniejszenie zużycia paliwa. Rozwój konstrukcji silników lotniczych odbywał się dzięki zastosowaniu do ich budowy nowoczesnych stopów, mogących pracować w temperaturze znacznie przekraczającej 1100°C, określanych mianem superstopów, których to rozwój na przestrzeni lat Doktorant przedstawił na Rysunku 3-4, niestety w tekście nie zamieścił odwołania do niego i jedynie podpis pod rysunkiem uświadamia czytelnika, czego dotyczy. Rozwojowi materiałów towarzyszył rozwój dyfuzyjnych warstw ochronnych, głównie aluminiowych, nazywane są przez Doktoranta powłokami ochronnymi. W opiniowanej pracy pojęcia powłoka ochronna i warstw ochronna stosowane są zamiennie, co niestety prawdopodobnie wynika z bezpośredniego tłumaczenia z języka angielskiego „coatings”, które to pojęcie dotyczy powłok, jak i warstw ochronnych, rzadziej używa się pojęcia „protective layer”. Podobnie na Rysunku 3-7, w opisie dla **powłokowej** bariery cieplnej – TBC zastosowano określenie ...”łopatka pokryta warstwą ceramiczną”. Co prawda powłoki mogą występować jako wielowarstwowe, jednak dla procesu natryskiwania cieplnego, czy osadzania metodami PVD stosuje się pojęcie powłoka.

Stosowanie coraz to trudniej obrabialnych materiałów, jak również zawężenie tolerancji wykonania elementów silników lotniczych, również chłodzonych, wymusza zastosowanie zaawansowanych technologii wykonywania otworów chłodzących. Początkowo, jak stwierdza Doktorant, otwory te wykonywano metodą wiercenia mechanicznego lub elektrochemicznie, jednak metody te okazały się niewystarczające. Dopiero zastosowanie obróbki elektroerozyjnej i obrabiarek sterowanych numerycznie,

umożliwiło wykonywanie małych otworów chłodzących, co odbywało się dzięki wykorzystywaniu cienkich elektrod w postaci rurek. Stanowiło to znaczny postęp technologiczny, gdyż dawało większe możliwości w zakresie kształtu i rozmieszczenia otworów chłodzących, wykonywanych na coraz to bardziej złożonych geometriach łopatkowych. Problemem jest jednak tzw. "warstwa zmieniona", zarówno pod względem struktury materiału, jak i składu chemicznego, co jak stwierdzono ma wpływ na konstytuowanie się warstw ochronnych, a może również wpływać na powstawanie pęknięć termomechanicznych w obszarze otworów chłodzących, (ang. – TMF cracs). Dlatego, jak stwierdza mgr inż. Marcin Trajer, prowadzone są badania nad doborem parametrów obróbki elektroerozyjnej, jak również nad optymalnym kształtem otworów chłodzących. Szczegółowo, tym zagadnieniom Autor poświęcił podrozdział drugi (3.2). Głównymi parametrami obróbki elektroerozyjnej (niestety Autor stosuje zapis rozdzielną "obróbka elektro erozyjna", "elektro drażnienie", co rzuca się w oczy czytelnika, zwłaszcza w nagłówkach podrozdziałów), których wpływ analizuje się bardzo szczegółowo są: napięcie i natężenie prądu obróbki, czas impulsu – czas pracy i czas płukania, które bezpośrednio wpływają na jakość obrabianej powierzchni tj. jej chropowatość, ale również na czas procesu technologicznego i zużycie narzędzia, czyli jego koszty. Drażnienie lub frezowanie elektroerozyjne prowadzone jest z wykorzystaniem specjalnych elektrod, początkowo litych, aktualnie posiadających kształt jedno lub wielokanałowej rurki, przez którą tłoczona jest woda dejonizowana, wypłukująca obszar prowadzonej obróbki. Budowa elektrody, materiał z jakiego została wykonana, jej średnica i długość, a nawet chropowatość wewnętrznych kanałów mają istotny wpływ na wydajność procesu, stanowiąc jednocześnie zbiór dodatkowych zmiennych, które jak stwierdza Doktorant mają bardzo istotne znaczenie w procesie wykonywania otworów chłodzących w elementach silników lotniczych.

Niewątpliwie dalszy rozwój konstrukcji silników lotniczych odbył się dzięki zastosowaniu warstw żaroodpornych, które znacznie zwiększyły odporność stopów na działanie korozji wysokotemperaturowej. Dyfuzyjne warstwy aluminidkowe, o grubości kilkudziesięciu mikrometrów znacznie wydłużyły żywotność łopatek turbinowych, a tym samym trwałość i resurs silników lotniczych, przyczyniając się również znacznie do bezpieczeństwa lotu w konstrukcjach cywilnych. Główną przyczyną degradacji materiałów konstrukcyjnych, stosowanych do budowy elementów turbin gazowych, co Doktorant opisuje w podrozdziale 3.3, są procesy utleniania, czyli korozji chemicznej i uszkodzenia spowodowane obecnością siarki, znacznie bardziej agresywne, mimo iż zachodzące w niższej temperaturze niż procesy "czystego utleniania". Problem "korozji siarkowej" – (ang. Hot

Corrosion, w języku polskim nie ma bezpośredniego odpowiednika tego pojęcia), dotyczy niszczenia materiałów – stopów na osnowie niklu, jak również stosowanych warstw ochronnych. Mgr inż. Marcin Trajer wskazał, jako główny powód katastrofalnej korozji siarkowej spalanie paliw, węglowodorów, mogących zawierać znaczne ilości związków siarki. Efektem ich spalania i reakcji zachodzących w środowisku chlorkowym może być powstawanie siarczanu sodu (Na_2SO_4), o stosunkowo niskiej temperaturze topnienia wynoszącej 884°C . Doktorant opisał mechanizmy korozji siarkowej typu I i II, które przyczyniają się do bardzo intensywnej korozji materiałów, o charakterze wżerowym. Bardzo często korozja ta zachodzi z nadspodziewaną intensywnością, w bardzo krótkim czasie, powodując katastrofalne uszkodzenia łopatek, doskonale przedstawia to Rysunek 3-59. Co prawda Doktorant nie wspomina o siarce obecnej w materiale – stopach, jednak jest to ciągle nie rozwiązany problem technologiczny, gdyż nie udało się skutecznie wyeliminować obecności siarki już na etapie odlewniczym, a wytwarzanie stopów o obniżonej jej zawartości jest niezmiernie kosztowne. Znaczący wzrost żaroodporności elementów turbin gazowych uzyskano dzięki zastosowaniu warstw aluminidkowych, zbudowanych głównie z faz międzymetalicznych NiAl i Ni_3Al . Na ich powierzchni podczas eksploatacji w wysokiej temperaturze tworzy się zwarta i dobrze przylegająca do podłoża warstwa Al_2O_3 , która chroni materiał podłoża przed dalszym utlenianiem. Doktorant stwierdza, że warstwa Al_2O_3 jest intensywniej niszczona w warunkach cyklicznie zmieniającej się temperatury, kiedy dochodzi do generowania dużych naprężeń termicznych i szybszego jej pęknięcia i złuszczenia. Aktualnie najczęściej stosowanymi procesami wytwarzania dyfuzyjnych warstw aluminidkowych są procesy gazowe VPA (Vapour Phase Aluminizing) i CVD (Chemical Vapour Deposition), które w swoich badaniach wykorzystuje mgr inż. Marcin Trajer. Technologia gazowa CVD jest szczególnie predysponowana do wytwarzania warstw ochronnych na chłodzonych łopatkach turbin. Proces degradacji warstw aluminidkowych Doktorant opisał w podrozdziale 3.4, w którym dokonał przeglądu stosowanych technologii aluminizacji dyfuzyjnej oraz ich wpływ na budowę warstw, ich grubość i zawartość Al, a także odporność na cykliczne utlenianie. Na Rysunku 3-69, autor zamieścił wyniki badań przedstawiające zawartość glinu i grubość warstw uzyskiwanych w procesach VPA, CVD, Slurry i Pack cementation. Na tej podstawie można stwierdzić, że proces VPA zapewniał uzyskiwanie warstw o największym stężeniu Al, wynoszącym od 33 do 37% wt., natomiast w procesie CVD uzyskano od 23 do 31% wt.. Grubość uzyskanych warstw wahała się od 40 do nawet 85 μm , dla procesu "out of pack". Najlepszą odpornością na utlenianie w opisanym

teście 23-godzinny charakteryzowała się warstwa o największej grubości i największym stężeniu Al, uzyskana na stopie IN718 w procesie bezkontaktowym.

W rozdziale 4 Doktorant podsumował dane literaturowe dotyczące procesu obróbki elektroerozyjnej i dotyczące procesu wytwarzania i degradacji aluminidkowych warstw ochronnych. **Wskazał na obszary, gdzie stan wiedzy jest niewystarczający lub nieuporządkowany, do nich należy: wpływ wydatku dielektryka podawanego przez elektrodę i jego zanieczyszczenie, zróżnicowane zakresy parametrów obróbki elektroerozyjnej, brak złożonego modelowania numerycznego uwzględniającego wymianę energii, nie uwzględnia się proporcji geometrycznych stosowanych elektrod, czy też wpływu wewnętrznej struktury elektrody, w małym stopniu analizuje się długotrwałą stabilność procesu. W zakresie warstw ochronnych mgr inż. Marcin Trajer stwierdza, że ważnym celem prowadzonych badań jest zapewnienie uzyskania rezerwuaru Al, który pozwoli na odtwarzanie ochronnej warstwy Al_2O_3 w jak najdłuższym czasie eksploatacji w wysokiej temperaturze.**

Na tej podstawie Doktorant sformułował w rozdziale 5 cel swoich badań, który dotyczył zbadania wpływu parametrów obróbki elektroerozyjnej na właściwości wytworzonych, dyfuzyjnych warstw ochronnych. Skoncentrował się na następujących zagadnieniach:

- opracowanie parametrów wykonywania otworów chłodzących, przy zapewnieniu powtarzalności procesu,
- zbadanie wpływu powierzchni zmodyfikowanej obróbką elektroerozyjną na trwałość warstw aluminidkowych wytworzonych metodami VPA i CVD,
- modyfikacja procesu elektrodrażenia pod kątem pozytywnego oddziaływania na warstwę antykorozyjną.

Jak Doktorant stwierdził na str. 78, główne elementy prowadzonych prac zakładały rozwój dwóch obszarów: 1) narzędzi cyfrowych pozwalających na zarządzanie procesem, akwizycję danych oraz umożliwiających optymalizację procesu i 2) dotyczących procesu elektrodrażenia i jego wpływu na wytwarzane warstwy aluminidkowe. Duża liczba danych, jak również możliwość ich analizy była możliwa dzięki wykorzystaniu przez mgra inż. Marcina Trajera systemu bazodanowego **CoolBox – DMES** (*Development and Manufacturing Execution System*), opierającego się na bazie danych Oracle oraz platformie analitycznej **SpotFire** firmy Tibco. Tak zaprojektowany system umożliwiał automatyczny transfer danych z elektrodrażarki, urządzenia pomiarowego i mikroskopu SEM firmy Jeol. Modyfikacje procesu realizowane były przy pomocy autorskiego oprogramowania **CoolBox G-Code**, które

pozwała na tworzenie programu bezpośrednio sterującego pracą elektrodrażarki. Główne założenia i kryteria wykonywania małych otworów chłodzących zostały podane przez Doktoranta w rozdziale 6. Ustalono, że analizie będą poddawane następujące parametry: napięcie, natężenie, czas wyładowania (wcześniej określany jako czas pracy lub czas impulsu), czas płukania, pojemność, wydatek wody przepływającej przez elektrodę, posuw elektrody i prędkość obrotowa elektrody. Badania prowadzono z wykorzystaniem elektrodrażarki 5 osiowej, która umożliwia wykonywanie otworów również metodą wierszowania.

Główne parametry urządzenia Doktorant opisał w podrozdziale 6.1, w którym dokonał także charakterystyki materiałów do badań tj. stopów IN718 i Rene N515 (w nagłówku Tabeli 6-1 podano, że dotyczy ona stopu Rene N5. Stopy Rene N5 i Rene N515 nie są tożsame, różnią się zawartością renu, zawierają odpowiednio 3% i 1,5% Re). Weryfikacja geometryczna wykonywanych otworów prowadzona była z zastosowaniem skanera Alicona G5 IFC200 – określanego jako urządzenie pomiarowe.

Do badań mgr inż. Marcin Trajer stosował głównie elektrody jednokanałowe o średnicach od 0,1 do 1,0 mm wykonane z mosiądzu (ok. 68% Cu i 32% Zn).

Podczas prowadzonych badań technologicznych, Autor zwrócił uwagę na zmiany przepływu wody przez stosowane elektrody, a co za tym idzie na różnice w płukaniu obszaru roboczego. Zainstalowanie przepływomierza, jak również seria prób pozwoliło na określenie limitu minimalnego przepływu wody – dielektryka. Zmodyfikował ponad to zacisk uchwytu elektrod, który powodował deformacje i zmianę wydatku przepływającej wody. Analiza budowy narzędzi wskazała na występowanie nieregularnego kształtu wewnętrznego kanału, co pozwoliło na wyeliminowanie wadliwych elektrod. Prowadzone badania umożliwiły zamodelowanie elektrody swobodnej o wymiarach nowej elektrody, a dobierane parametry wpływały na uzyskiwaną chropowatość, weryfikowaną w pomiarach rzeczywistych.

Kolejnym etapem prowadzonych badań było zasymulowanie zagłębiania się elektrody w obrabiany materiał, jak również zbadanie wpływu tego procesu na rozkład prędkości płynu – wody w obszarze wierzchołka i naroża elektrody, Doktorant brał również pod uwagę ilość cząstek wypłukiwanego materiału, linie prądu i powstające obszary wirowe. Wynikiem prac była wizualizacja rozkładu prędkości płynu (Rysunek 6-13 i 6-14) oraz określenie czy parametry w postaci prędkości obrotowej elektrody i chropowatości ścianek otworu są zależne od prędkości przepływającego medium. Analizie została poddana także wartość ciśnienia płynu, która malała w obszarze ścianek elektrody. Niestety przeprowadzona analiza, mimo jak wydaje się dobrego udokumentowania zamieszczonymi wynikami, nie jest czytelna

i jednoznaczna, gdyż Autor nie odwołuje się w tekście do pojawiających się rysunków, nie markeruje – wskazuje też w żaden sposób opisywanych zjawisk np. linii prądu.

W podrozdziale 6.4 Doktorant opisuje wpływ posuwu elektrody na stabilność procesu drażenia. W oparciu o prowadzone testy i symulacje próbował dobierać różnorakie metryki, jednak uzyskiwane wyniki były niezadawalające, co też zdecydowało o wyborze najkrótszego czasu drażenia, prawdopodobnie przedstawionego na Rysunku 6-27, gdyż nie ma odpowiedniego odwołania w tekście. **Można stwierdzić, że duża liczba danych, zamieszczonych w pracy wyników w postaci wykresów, statystyk, zrzutów ekranu jest mało czytelna dla odbiorcy, zwłaszcza jeśli nie jest odpowiednio skomentowana. Sam podpis pod rysunkiem, w opinii recenzenta, jest niewystarczający do pełnego zrozumienia opisywanych zjawisk.**

Mgr inż. Marcin Trajer, w podrozdziale 6.5 określił optymalną wartość obciążenia cyklu, wynoszącą 50%, która zapewniała największą stabilność procesu elektrodrażenia. Natomiast w podrozdziale 6.6 zbadał wpływ rodzaju obrabianego materiału na takie parametry jak: prędkość usuwanego materiału, zużycie elektrody, promieniowe rozbiecie otworu i wskaźnik smukłości, które zostały zebrane w tabelach 6-6 i 6-7. Obróbkę różnych, pod względem właściwości, materiałów prowadzono dla ustalonych i tych samych parametrów, podanych na str. 107. Wyniki badań zostały opublikowane przez Doktoranta i zaprezentowane podczas konferencji ESAFORM 2023, organizowanej przez AGH w Krakowie. Pozwoliły one, w oparciu o wyliczony współczynnik erozji ER_{index} , na określenie podatności obrabianych materiałów na obróbkę elektroerozyjną.

Autor stwierdził, że istotny wpływ na przebieg procesu elektrodrażenia ma zastosowanie elementów pojemnościowych – kondensatorów (podrozdział 6.7), co nie jest opisywane w literaturze fachowej, natomiast ma znaczący wpływ na szybkość drażenia, jak i na zużycie narzędzia – elektrody. Jednak badania w tym zakresie powinny być kontynuowane, gdyż jak zaobserwował Doktorant, zastosowanie większych elementów pojemnościowych powodowało większe zużycie elektrod, nawet o 25-35%, jednak nie skutkowało skróceniem czasu obróbki. Wpływ zastosowanych elektrod, pochodzących od różnych dostawców, mgr inż. Marcin Trajer analizował w podrozdziale 6.8, gdyż stwierdził, że przepływ dielektryka przez elektrodę jest istotnym parametrem, wpływającym na stabilność i powtarzalność procesu. To spostrzeżenie spowodowało również, wprowadzenie etykiety "Dostawca" w wykorzystywanym systemie CoolBox-DMES.

Technologii wykonywania otworów kształtowych Doktorant poświęcił podrozdział 6.9, gdyż jak stwierdził zapewniają one większą sprawność chłodzenia w porównaniu do

otworów okrągłych. Wygląd i geometrię takiego otworu przedstawił na Rysunku 6-45, którego wykonanie wiąże się z opanowaniem technologii wierszowania i spiralną ścieżką narzędzia (Rysunek 6-46) oraz określeniem posuwu elektrody kompensującego jej zużycie. Efektem prac było opracowanie kilku ścieżek przemieszczania się elektrody, z których oznaczona jako "zlevel-xy-first" zapewniała najlepszą stabilność geometryczną i uzyskanie wymagań zgodnych z rysunkiem (założeniami). Ze względu na złożoność procesu i wpływ wielu zmiennych, Doktorant uważa jednak, że prace związane z obróbką elektrodą rotującą wymagają kontynuacji, zwłaszcza w obszarze jego zautomatyzowania (digitalizacji).

Opanowanie podstaw technologicznych procesu elektrodrażenia, opisane w rozdziale 6, pozwoliło mgr inż. Marcinowi Trajerowi zająć się zagadnieniami wytwarzania warstw ochronnych oraz zbadaniem wpływu prowadzonego procesu wykonywania otworów chłodzących na ich właściwości. Badania prowadzone w rozdziale 7, Doktorant określił jako badania wstępne (podrozdział 7.2) oraz badania główne, którym poświęcił rozdział 8.

Do badań wstępnych zastosował próbki ze stopu IN718, w których wykonał trzy serie otworów o średnicach 0,4; 0,5 i 1 mm, stosując elektrody o średnicy 0,3 i 0,4 mm, natomiast do otworów o największej średnicy tj. 1 mm stosował elektrodę 0,5 mm i metodę wierszowania. **Warstwy aluminidkowe Doktorant wykonał dzięki podjętej współpracy z firmą Avio Polska w Bielsku-Białej – metodą "over pack" i metodą gazową – CVD w Uczelnianym Laboratorium Badań dla Przemysłu Lotniczego w Politechnice Rzeszowskiej.** Główne parametry procesu dyfuzyjnego aluminiowania, nazywanego VPA lub "out of pack" zostały przedstawione w Tabelach 7-1 i 7-2. Wątpliwość budzi jednak ilość aktywatora w postaci fluorku amonu, w ilości 40 kg, gdyż stosuje się znacznie mniejsze ilości tego składnika, zazwyczaj od 1 do kilku procent w stosunku do masy donora (prawdopodobnie błąd edytorski – 0,4 kg).

Na str. 128 Doktorant opisał metodykę badań adhezji, których to wyników nie zamieścił w pracy? Recenzent przypuszcza, że jest to jednak fragment, który na etapie edycji pracy miał zostać usunięty, gdyż przytoczona metodyka badawcza jest stosowana do oceny przyczepności powłok o charakterze adhezyjnym np. PVD – (o grubości 1-6 μm), natomiast nie jest stosowana do badań warstw dyfuzyjnych.

Pytanie budzi też, głębokość wykonanych otworów, przedstawiona na schemacie – Rysunek 7-6, określona na ok. 20 mm oraz wygląd próbek przedstawiony na Rysunku 7-1, na którym otwory zostały wykonane pod pewnym kątem, co sugeruje eliptyczny ich kształt. Co prawda trudno określić grubość materiału na Rysunku 7-1 (brak markera), to jednak wydaje się, że przy głębokości drażenia 20 mm, otwory te mogłyby powstać jako otwarte – wykonane

”na przestrzał”. Czy tak rzeczywiście było ? Czy wykonane otwory były ”ślepe”, co sugeruje Rysunek 7-6? Kanały chłodzące w łopatkach mają czasem bardzo skomplikowany kształt, jednak przepływa przez nie powietrze.

Na Rysunku 7-8 Doktorant zamieścił schemat, oznakowanie otworów i odpowiednio przekroje, które były analizowane. Na rysunku tym zaznaczono punkty analizy A, B, C, D, E. Jaka była odległość od powierzchni poszczególnych punktów pomiarowych? Niestety opisy na Rysunkach 7-10 i 7-11 są nieczytelne.

Doktorant, po procesie wytworzenia warstw ochronnych, przeprowadził test tzw. oksydacji, w temperaturze 1100°C, w czasie 23 godz. i atmosferze powietrza. Jest to standardowy test sprawdzający, mówiący o poprawności wykonania warstwy, a w sposób pośredni o jej odpowiedniej grubości i założonym stężeniu glinu w warstwie. Próbkę po tym teście zostały przecięte i wykonano z nich zgłady metalograficzne do analizy zawartości glinu i pomiarów grubości warstwy. Wygląd otworów oznaczonych jako: A – 1 mm, B – 0,5 mm i C – 0,4 mm, przedstawiono na Rysunku 7-12. Autor na Rysunku 7-13 i 7-14 zamieścił: wygląd zgładu metalograficznego, mikrostrukturę warstwy oraz wyniki mikroanalizy przeprowadzonej metodą EDS. Zastanawiający jest natomiast dobór punktów analizy tj. pkt 9 i 10 oraz 6 i 7, znajdujących się na głębokości 25-30 μm . Na jakiej podstawie dokonano ich wyboru? Zgodnie z normą pomiaru stężenia glinu w warstwie dokonuje się 5 μm od powierzchni, natomiast dla określenia gradientu stężenia na głębokości 30 μm .

Przedstawione na Rysunkach 7-14 do 7-18 mikrostruktury warstw, w obszarze otworów, których eliptyczny kształt sugeruje, iż nie zostały przecięte prostopadłe służyły do pomiaru ich grubości. Jak dokonywano tego pomiaru?

Otwór oznaczony jako ”A” był wykonany metodą wierszowania i miał średnicę 1 μm , natomiast na Rysunku 7-15, zamieszczony na zdjęciu marker długości sugeruje zupełnie inną wartość. Jak to wyjaśnić? Podobnie na Rysunkach 7-17 i 7-18?

Na zamieszczonym Rysunku 7-22b Autor przedstawił mikrostrukturę warstwy na której zaznaczono miejsce przeprowadzonej analizy składu chemicznego, pkt. 13, dla której stwierdził stężenie glinu na poziomie 40% wag., jest to pomiar przeprowadzony ok. 5 μm od powierzchni. Czy prowadzono pomiary zawartości glinu również w miejscach niezdefektowanych?

W rozdziale 8 mgr inż. Marcin Trajer stara się odpowiedzieć na pytanie, jak zmienia się w warstwach zawartość glinu podczas utleniania – długotrwałego testu oksydacji, jak zmienia się stężenie glinu w funkcji głębokości otworu i czy zastosowane parametry elektrodrażenia mają wpływ na zachowanie się warstw podczas testu utleniania. Badania

określone jako główne, Doktorant prowadził na dwóch stopach tj. IN718 i Rene N515, stosując dwa parametry elektrodrażenia: 1) 200J i $T_{on} - 30$ ms, oznaczone jako X i 2) 400J i $T_{off} - 60$ ms, oznaczone jako Y. Wyniki badań mikrostrukturalnych oraz analiz chemicznych wytworzonych metodą VPA i CVD warstw Autor zamieścił w podrozdziale 8.1. Zmiany w mikrostrukturze warstw aluminidkowych w zależności od głębokości otworu, zachodzące po teście oksydacji Doktorant przedstawił na Rysunkach 7-27 do 7-28, natomiast zmiany stężenia glinu w warstwach na Rysunkach 7-29 do 7-32. Na Rysunku 7-33 przedstawiono uśredniony wykres zmian stężenia glinu określony dla danego przekroju np. A, na podstawie którego Doktorant stwierdza, że proces elektrodrażenia prowadzony przy niższej energii tj. 200J sprzyjał uzyskiwaniu większej zawartości tego pierwiastka, zarówno dla technologii VPA, jak i CVD aluminowania dyfuzyjnego.

Prowadzona przez mgr inż. Marcina Trajera analiza pozwala stwierdzić, że warstwy wytworzone w procesie VPA charakteryzowały się znacznie większą grubością, str. 142, ich grubość była też dwukrotnie większa w stosunku do uzyskanych w procesie CVD, jednak już w przekrojach 3 i 4 w otworach warstwa zanika, co doskonale widoczne jest po 120 i 264 godzinach utleniania i skutkuje znaczną ilością produktów korozji.

W podsumowaniu zamieszczonym w podrozdziale 8.2 Doktorant stwierdził, że czynnikami wpływającymi na budowę warstwy dyfuzyjnej są zarówno głębokość otworu, zastosowana technologia aluminowania dyfuzyjnego, jak i parametry procesu elektrodrażenia. Zastosowania technologii VPA, pozwala na uzyskanie warstw o większym stężeniu glinu, natomiast "względność procesu", czyli możliwość wytwarzania warstw w otworach jest mniejsza niż stwierdzona dla procesów CVD. Doktorant upatruje przyczyny takiego stanu rzeczy w mniejszej aktywności glinu w procesie VPA, a także mniejszej dynamice tego procesu. Stwierdza również, biorąc pod uwagę średnie nasycenie warstwy glinem, że wpływ parametrów procesu elektrodrażenia jest istotniejszy niż zastosowana technologia aluminowania dyfuzyjnego.

W opinii recenzenta, wniosek dotyczący wyższej dynamiki procesu gazowego CVD, jest jak najbardziej uzasadniony, gdyż technologia ta jest preferowana zwłaszcza dla wytwarzania warstw na elementach chłodzonych, umożliwia w niektórych rozwiązaniach wymuszony przepływ atmosfery reakcyjnej zarówno przez kanały chłodzące, jak i w obszarze zewnętrznych powierzchni pióra łopatek.

Mgr inż. Marcin Trajer w rozdziale 9 dokonał podsumowania przeprowadzonych prac, zarówno dotyczących procesu elektrodrażenia, jak i związanych z metodami wytwarzania warstw ochronnych w kanałach chłodzących elementów turbinowych. Doświadczenie

technologiczne, związane z prowadzonymi przez Doktoranta eksperymentami, pozwoliło Mu na określenie pewnych ograniczeń procesu elektrodrażenia oraz wskazało kierunki, ale też i konieczność dalszych systematycznych badań nad technologią wykonywania małych otworów chłodzących. Ciągłe nie rozwiązany problemem, z czym zgadza się recenzent, jest uzyskanie w otworach chłodzących łopatek turbinowych warstw ochronnych o lepszych właściwościach, większej ich grubości i trwałości, co związane jest z ich budową, składem fazowym, a zwłaszcza stężeniem glinu, konsumowanego w procesie korozji wysokotemperaturowej. Potrzebę prowadzenia dalszych prac oraz szczegółowy ich zakres Doktorant podał w rozdziale 10 i podrozdziałach 10.1 i 10.2.

W mojej ocenie zaangażowanie Doktoranta w prace badawczo-rozwojowe realizowane w General Electric Company Polska, Laboratorium Zaawansowanych Technologii Produkcyjnych, dotyczące wytwarzania elementów chłodzonych silników lotniczych, jest bardzo istotne z naukowego punktu widzenia, a aspekt użytkowy prowadzonych badań podnosi wartość recenzowanej rozprawy doktorskiej, realizowanej w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy”.

Do pewnych mankamentów rozprawy, których nie wymieniłem wcześniej należy zaliczyć:

- podawanie literatury źródłowej w nawiasach okrągłych np. (1), przyjęto stosowanie nawiasów kwadratowych, nawiasy okrągłe stosowane są do numeracji: wzorów, równań reguł itp.,
- brak numeracji podawanych wzorów,
- znaczne pomniejszenie rysunków, grafik, mikrostruktur, czyni je nieczytelnymi,
- błędy literowe i gramatyczne,
- stosowanie skrótów myślowych,
- zastosowanie mikroanalizy EDS do określenia stężenia tlenu,
- brak na fotografiach makro markerów długości, podziałki mm,
- brak w tekście komentarzy i przywołań do rysunków, które pojawiając się zaskakują czytelnika.

Wymienione usterki, głównie o charakterze edytorskim nie mają jednak istotnego znaczenia biorąc pod uwagę merytoryczną ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Trajera, którą oceniam bardzo wysoko. Po przeczytaniu pracy recenzentowi nasunęły się następujące pytania do Autora:

1. W pracy kilkakrotnie pojawia się stwierdzenie, że obróbka elektroerozyjna ma istotny wpływ na stan powierzchni: skład chemiczny, skład fazowy i chropowatość

- powierzchni. W pracy nie zamieszczono wyników badań np. jak zmienił się skład chemiczny obrabianego stopu w miejscu obróbki w stosunku do materiału nie obrabianego. Czy takie badania były prowadzone?
2. Do procesu elektrodrażenia wykorzystywano elektrodę mosiężną, Tabela 6-2, str. 84. Czy w związku z tym możliwe jest powstawanie trudnych do usunięcia zanieczyszczeń powierzchni miedzią?
 3. W części literaturowej pracy, na Rysunku 3-69, str. 71, przedstawiono wyniki pomiarów grubości warstw aluminidkowych uzyskiwanych różnorodnymi metodami, a także odpowiadające im wartości stężenia glinu w warstwach. Zwłaszcza dla metody VPA stężenie to wahało się od 33-37% wag. Jest to pewien standard. Na Rysunku 7-15, str. 135b, widoczna na mikrostrukturze jest strefa nazywana "blue zone", o grubości ok. 12 μm , która sugeruje, że zawartość glinu w tej strefie wynosi 30 lub więcej % wag. Al. Jak wytłumaczyć stosunkowo niską zawartość glinu, na poziomie 20-23% wag.? (Rysunek 7-31 i 7-32 przekrój -1)

Ocena końcowa

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Marcina Trajera, zamieszczone w niej treści, dotyczące zarówno przyjętej metodyki badawczej, jak i wyników przeprowadzonych badań oraz ich analiza pozwalają na stwierdzenie, że Doktorant bardzo dobrze porusza się tematyce obróbki elektroerozyjnej i dyfuzyjnych warstw aluminidkowych, doskonale opanował i rozbudował zaawansowane narzędzia cyfrowe pozwalające na zarządzanie procesem obróbki. Dobrze zaplanował eksperymenty badawcze, dobrał odpowiednie metody badań, dobrze i w sposób dojrzały przeprowadził analizę uzyskanych wyników. Podjął współpracę z firmą Avio Polska i Uczelnianym Laboratorium Badań dla Przemysłu Lotniczego w Politechnice Rzeszowskiej w zakresie nowoczesnych metod wytwarzania warstw ochronnych. Bardzo wysoko oceniam przeprowadzone badania wpływu istotnych parametrów procesu elektrodrażenia oraz rozbudowanie w oparciu o uzyskane wyniki bazy danych obróbczych urządzenia, które samodzielnie obsługuje.

Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska mgra inż. Marcina Trajera prezentuje odpowiedni poziom naukowy, ma charakter użyteczny i stanowi opracowanie oryginalne, posiada szereg wartościowych rezultatów poszerzających wiedzę o obróbce elektroerozyjnej, które stanowią ważny wkład Doktoranta w rozwój

potencjału i możliwości jego miejsca pracy. W mojej opinii recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim i wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie mgr inż. Marcina Trajera do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Marek Bogusław