

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Pyclika**  
**Tytuł rozprawy: „Technologiczne podstawy zwiększenia żaroodporności**  
**monokrystalicznego stopu Rene’N5”**

*Recenzja niniejszej rozprawy została przygotowana na podstawie uchwały nr 135/2023 Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej z dnia 24 października 2023 r., podpisanej przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa PŚ, prof. dr hab. inż. Marię Sozańską.*

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy problematyki o istotnej wartości poznawczej i praktycznej związanej z nowymi możliwościami kształtowania budowy warstwy ochronnej na elementy w strefie przepływu gazów turbiny silnika lotniczego.

Szybki rozwój lotnictwa, a zwłaszcza konstrukcji napędów lotniczych jest możliwy między innymi dzięki modyfikacji elementów i podzespołów konstrukcyjnych silników jak również, przez zastosowanie do ich budowy nowoczesnych materiałów inżynierskich. Są to głównie nowe gatunki nadstopów niklu i zmodyfikowane materiały stosowane na powłokowe bariery cieplne – umożliwiające zwłaszcza podwyższenie temperatury gazów spalinowych w części gorącej silnika tj. turbinie wysokiego ciśnienia.

Rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Pyclika odnosi się do problematyki zwiększenie żaroodporności warstw aluminiokowych wytwarzanych na monokrystalicznym nadstopie niklu Rene’N5, który jest uważany za jeden z najbardziej odpornych na utlenianie stopów wysokotemperaturowych stosowanych komercyjnie. Motywacją do podjęcia tematu była analiza stanu technicznego aluminiowanych kierownic turbiny niskiego ciśnienia silnika GE9X po eksploatacji, która wykazała, że stosowana dotychczas technologia dyfuzyjnego aluminiowania jest niewystarczająca dla zachowania wymaganej trwałości tak odpowiedzialnych komponentów w warunkach eksploatacji.

Doktorant bazując na wynikach prób technologicznych, zmodyfikował parametry procesy aluminiowania i przeprowadził ich weryfikację na instalacji przemysłowej, uzyskując zmodyfikowaną warstwę aluminiokową o dwukrotnie wyższym rezerwuarze Al niż w warstwie z procesu wyjściowego. Przełożyło się to na dwukrotne zwiększenie ilości cykli, po których próbki ze zmodyfikowaną warstwą aluminiokową wróciły do masy początkowej w badaniach cyklicznego utleniania. Przeprowadzone badania wytrzymałości zmęczeniowej pozwoliły

POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
Rada Dyscypliny  
Inżynieria Materiałowa

wpłynęło dnia .....  
*M. Sozańska*

Dr ..... zał. ....

stwierdzić, że wzrost grubości i zawartości Al w zmodyfikowanej warstwie aluminidkowej nie przełożyły się na pogorszenie właściwości mechanicznych w przebadanym zakresie temperatury.

Rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Pyclika zredagowana jest w tradycyjny sposób z podziałem na część literaturową, część doświadczalną i wyniki badań własnych. Praca liczy ogółem 168 stron z podziałem na 10 rozdziałów: rozdział 1 - wstęp (4 strony), rozdział 2 – przegląd literatury (43 strony), w którym zawarto również istotny, a często pomijany końcowy podrozdział 2.5 – posumowanie stanu zagadnienia, zawierający elementy uzasadnienia podjęcia tematyki badawczej niniejszej dysertacji, rozdział 3 – cel i zakres pracy (9 stron), rozdział 4 – metody badawcze (40 stron), rozdział 5 – badania nad efektywnością osadzania warstw aluminidkowych (28 stron), rozdział 6 – badania nad dalszym zwiększeniem odporności na utlenianie (13 stron), rozdział 7 – wnioski końcowe (3 strony). Całość zakończona jest spisem literatury czyli bibliografią (6 stron), spisem rysunków (9 stron) oraz spisem tabel (2 strony), które moim zdaniem niepotrzebnie zostały oznaczone jako rozdziały 8, 9 i 10. Zwykle w tego typu rozprawach podrozdział „Bibliografia” jak również spis rysunków i tabel nie są wyodrębnione kolejnym numerem rozdziału. Rozprawa zawiera również niezbędne streszczenie w języku polskim i angielskim oraz wykaz najważniejszych oznaczeń, bardzo pomocne podczas lektury niniejszej dysertacji. Ponadto w pracy Autor zamieścił 126 rysunków oraz 35 tabel. W rozprawie zacytowano 92 pozycje bibliograficzne, w większości jest to literatura źródłowa i pochodzi z ostatnich 15 lat (56%).

Treść pracy w pełni odpowiada tytułowi. Około 28% objętości treści pracy poświęcone jest rozpoznaniu literaturowemu, reszta omówieniu metodyki badań, wynikom badań własnych oraz ich analizie. Zastosowana w pracy terminologia jest właściwa, symbolika również.

## **1. Charakterystyka szczegółowa**

### **2.1. Tytuł i tematyka pracy**

Tytuł pracy dobrze odzwierciedla różnorodne, szeroko zakrojone prace empiryczne składające się na treść rozprawy. Tematyka pracy jest oryginalna, aktualna i naukowo uzasadniona. Modyfikacja składu chemicznego warstw ochronnych stosowanych między innymi w silnikach lotniczych, bezpośrednio podczas procesu aluminiowania, w wyniku zmian parametrów tego procesu, może doprowadzić do uzyskania zmodyfikowanej warstwy aluminidkowej o innych lepszych niż dotychczas uzyskiwane właściwościach - zwłaszcza większej żaroodporności. Takie badania są przedmiotem coraz większego zainteresowania przemysłu, wynika to między innymi ze względów ekonomicznych i ekologicznych.

Kształtowanie warstwy powierzchniowej materiałów inżynierskich metodami inżynierii powierzchni to aktualnie rozwijany kierunek na świecie. Modyfikacja zarówno stopów metali przeznaczonych na elementy silników lotniczych, sposobów ich wytwarzania i chłodzenia podczas pracy w podwyższonej temperaturze zmusza do podjęcia działań nad znacznym obniżeniem rzeczywistej temperatury podłoża, co skutkuje zwiększeniem jego trwałości eksploatacyjnej.

W celu zwiększenia odporności na utlenianie stopów niklu stosuje się warstwy lub powłoki ochronne, które promują tworzenie pasywnej zgorzeliny tlenku glinu  $Al_2O_3$  i ograniczają wpływ środowiska na materiał podłoża. Najszerszej występującymi warstwami ochronnymi na elementy w strefie przepływu gazów turbiny silnika lotniczego są konwencjonalne warstwy aluminidkowe. Do najstarszych i najszerszej stosowanych metod wytwarzania warstw dyfuzyjnych na żarowytrzymałych stopach niklu zalicza się metodę kontaktowo-gazową, którą nazywa się również metodą proszkową. Proces wytwarzania metodą kontaktowo-gazową można przeprowadzać w typowych piecach komorowych stosowanych np. do hartowania stali dostosowanych do pracy w temperaturze do  $1100^{\circ}C$ . Obecnie wiodącymi metodami wytwarzania warstw aluminidkowych są metody: gazowa (CVD) i bezkontaktowa „out-of-pack”, będąca rozwinięciem metody kontaktowo-gazowej. Procesy te pozwalają na pokrywanie wielu elementów o skomplikowanych kształtach i przy dużej powtarzalności wyników.

Procesem wyjściowym w realizowanych w recenzowanej pracy badaniach warstw aluminidkowych był standardowy proces produkcyjny, niskoaktywny, wysokotemperaturowy. Proces umożliwia uzyskiwanie na próbkach z nadstopu niklu Rene’N5 konwencjonalnych warstw aluminidkowych o dwustrefowej budowie i średniej całkowitej grubości  $53\ \mu m$  oraz zawartości Al 30,6% mas., zgodnych z wymaganiami dla kierownic turbiny. Próbki z uzyskaną warstwą poddano badaniom mikrostrukturalnym, cyklicznego utleniania i niskocyklowego zmęczenia. Uzyskane wyniki badań wskazały potrzebę modyfikacji procesu aluminiowania stosowanego w Firmie Avio Polska w celu poprawy odporności stopu Rene’N5 na utlenianie.

W związku z powyższym podjęto badania nad efektywnością osadzania na nadstopie Rene’N5 warstw aluminidkowych – opisane w rozdziale 5.

Przeprowadzono badania:

- wpływu parametrów technologicznych, temperatury, przepływu gazów, ciśnienia i czasu procesu,
- ilości aktywatora i typu donora,
- wpływu przestrzeni roboczej retorty,
- wpływu jakości powierzchni pokrywanej i chropowatości powierzchni uzyskanej warstwy

ochronnej,

- wpływu geometrii pokrywanych elementów.

Uzyskane wyniki badań posłużyły do zdefiniowania nowych parametrów procesu aluminiowania, co skutkowało zmodyfikowaniem przemysłowego procesu aluminiowania w Firmie Avio Polska. Proces aluminiowania, nazywany zmodyfikowanym jest procesem niskoaktywnym, wysokotemperaturowym, prowadzonym na instalacji przemysłowej wg nowej receptury bazującej na wynikach przeprowadzonych prób. Modyfikacja procesu aluminiowania spowodowała zwiększenie efektywności osadzania warstw aluminidkowych, co powinno mieć wpływ na żaroodporność warstw aluminidkowych wytwarzanych na monokrystalicznym nadstopie niklu Rene'N5 poprzez modyfikację parametrów procesowych. Stwierdzono jednak, że stop Rene'N5 niepokryty warstwą aluminidkową charakteryzuje się lepszą odpornością na cykliczne utlenianie niż materiał ten poddany procesowi zmodyfikowanego aluminiowania dyfuzyjnego.

Dlatego też, podjęto próbę opracowania procesu dwuetapowego, oznaczonego jako Pt + Al, pozwalającego na uzyskanie wzrostu żaroodporności w stosunku do niepokrytego nadstopu Rene'N5, dzięki wytworzeniu faz Pt-Al o wysokiej żaroodporności. Pozwoliło to na zmaksymalizowanie już zadawalających efektów, zagwarantowanych przez zmodyfikowany proces aluminiowania dyfuzyjnego.

- **Problematykę recenzowanej rozprawy doktorskiej uznać należy jako trafną, tak z punktu widzenia poznawczego, jak również praktycznego, ze względu na możliwość zwiększenia żaroodporności warstw aluminidkowych wytwarzanych na monokrystalicznym nadstopie niklu Rene'N5 poprzez zarówno modyfikację parametrów procesu aluminiowania jak również modyfikację tych warstw platyną.**

## 2.2. Stan zagadnienia

Analiza obecnego stanu wiedzy w obszarze konstrukcji, technologii i eksploatacji potwierdza w dużym stopniu pogląd, że postęp techniki w XXI wieku wciąż zależy od rozwoju materiałów i technologii materiałowych oraz metod modyfikacji powierzchni materiałów zapewniających odpowiednią trwałość eksploatacyjną. Aby nie pozostać tylko biernymi uczestnikami efektów rozwoju materiałów i zaawansowanych technologii oraz eksploatacji w warunkach ciągle zwiększających się wymagań przemysłu, ale chcąc aktywnie w nich uczestniczyć, należy dążyć zarówno do rozszerzenia wiedzy w obszarze charakterystyki materiałów i technologii, jak i do planowanego ich stosowania w określonych warunkach.

Recenzowana rozprawa doktorska wystarczająco spełnia omówione założenia.

Część literaturowa rozprawy prezentuje wyczerpujący i usystematyzowany przegląd stanu wiedzy obejmujący: wymagania stawiane elementom silników lotniczych, materiały wykorzystywane w konstrukcji silników lotniczych, charakterystykę monokrystalicznego nadstopu niklu drugiej generacji Rene’N5, metody ochrony elementów turbin silników lotniczych. Dopełnieniem części literaturowej rozprawy jest rozdział w którym dokonano zwięzłego podsumowania stanu zagadnienia, będący jednocześnie uzasadnieniem podjęcia tematyki badawczej niniejszej dysertacji.

**Przedmiotem prowadzonych przez Doktoranta badań było kształtowanie mikrostruktury warstw aluminidkowych z wykorzystaniem metody „out-of-pack” na instalacjach w skali laboratoryjnej i przemysłowej. Przeprowadzone próby technologiczne pozwoliły na określenie wpływu kluczowych parametrów procesu aluminiowania, takich jak: rodzaj złoza, sposób obróbki cieplnej, przestrzeń robocza urządzeń, jakość powierzchni obrabianych elementów oraz ich geometria.**

Uzyskane wyniki badań, przeprowadzona ich analiza i wnioski, posłużyły do modyfikacji procesu aluminiowania. Uzyskane w toku badań warstwy aluminidkowe zostały zweryfikowane poprzez badania właściwości użytkowych, izotermicznego i cyklicznego utleniania oraz nisko cyklicznego zmęczenia. Najlepiej rokujące procesy technologiczne przeszły fazę demonstracji nowej technologii poprzez wytworzenie warstwy aluminidkowej na elemencie produkcyjnym.

W świetle przedstawionych uwarunkowań za uzasadnione wydaje się podjęcie przez Autora recenzowanej rozprawy doktorskiej badań nad wytwarzaniem użytkowych warstw ochronnych w postaci warstw aluminidkowych w celu poprawy żaroodporności elementów silników lotniczych.

### **2.3. Cel i zakres pracy**

W oparciu o przedstawiony przegląd literatury oraz wnioski wyciągnięte z tego przeglądu, Autor przyjął następujący cel badawczy:

Głównym celem pracy było zwiększenie żaroodporności warstw aluminidkowych wytwarzanych na monokrystalicznym nadstopie niklu Rene’N5 poprzez modyfikację parametrów procesu aluminiowania stosowanego w Firmie Avio Polska Sp. z o. o..

**Według recenzującego niniejszą rozprawę doktorską do celu pracy powinna być dodatkowo dodana modyfikację warstw aluminidkowych platyną, co skutkowało**

**uzyskaniem warstw ochronnych o najlepszych właściwościach uzyskanych w teście cyklicznego utleniania.**

Przedmiotem prowadzonych badań było kształtowanie mikrostruktury warstw aluminidkowych z wykorzystaniem metody „out-of-pack” (gazowej – bezkontaktowej) na instalacjach w skali laboratoryjnej i przemysłowej. Przeprowadzone próby technologiczne pozwoliły na określenie wpływu kluczowych parametrów procesu aluminiowania.

Uzyskane wyniki badań, przeprowadzona ich analiza i wnioski, posłużyły do modyfikacji procesu aluminiowania prowadzonego aktualnie w Firmie Avio Polska Sp. z o. o..

Uzyskane w toku badań warstwy aluminidkowe zostały zweryfikowane poprzez badania właściwości użytkowych, izotermicznego i cyklicznego utleniania oraz nisko cyklicznego zmęczenia. Najlepiej rokujące procesy technologiczne przeszły fazę demonstracji nowej technologii poprzez wytworzenie warstwy aluminidkowej na elemencie produkcyjnym.

Ponadto opracowano proces modyfikacji warstw aluminidkowych platyną, co doprowadziło do uzyskania wzrostu żaroodporności w stosunku do niepokrytego nadstopu Rene’N5, dzięki wytworzeniu faz Pt-Al o wysokiej żaroodporności. Pozwoliło to na zmaksymalizowanie już zadawalających efektów, zagwarantowanych przez zmodyfikowany proces aluminiowania dyfuzyjnego.

#### **2.4. Metody badawcze**

Metodyka badań została szczegółowo opisana. Zastosowane w rozprawie metody badawcze oceniam wysoko, szczególnie interesujące są badania izotermicznego i cyklicznego utleniania oraz nisko cyklicznego zmęczenia. Doktorant wykorzystał nowoczesną aparaturę i stosował metody, jakich można oczekiwać w tego rodzaju pracy. Każda z zastosowanych metod badawczych miała merytoryczne uzasadnienie i była niezbędną dla zrealizowania celu i zakresu pracy. Ponadto Doktorant precyzyjnie opisał materiały użyte do badań, rodzaje próbek oraz sposoby wytwarzania warstw aluminidkowych na materiale podłoża, czyli na monokrystalicznym nadstopie niklu drugiej generacji – Rene’N5. Metodyka badań nie budzi zastrzeżeń, a wszystkie techniki badawcze zastosowano celowo.

#### **2.5. Wartość merytoryczna pracy**

Treść rozprawy wskazuje, że jej realizacja przebiegała zgodnie z przyjętym zakresem

pracy. Dla potwierdzenia głównego celu pracy Autor rozprawy zrealizował kompleksowy program badań oraz obejmujący między innymi następujące zadania badawcze:

1. Przeanalizowanie dokumentacji z dotychczas stosowanego procesu aluminiowania w Firmie Avio Polska Sp. z o. o..
2. Przeanalizowanie raportów laboratoryjnych z stosowanego do tej pory w Firmie Avio Polska Sp. z o. o.. procesu aluminiowania.

Analiza w/w dokumentacji wykazała potrzebę modyfikacji procesu aluminiowania stosowanego w Firmie Avio Polska w celu:

1. Zwiększenia zawartości glinu w warstwie ochronnej oraz zwiększenie grubości tej warstwy.
2. Ograniczenia lub wyeliminowania zanieczyszczeń.
3. Możliwości wytwarzania warstw aluminiowych w kanałach chłodzących, których wprowadzenie może efektywnie obniżyć temperaturę elementu, a co za tym idzie, zwiększenie jego żywotności w odniesieniu do aktualnie stosowanych warstw aluminiowych.

Nadmienić należy, że Doktorant przeprowadził dalsze badania nad rozwojem warstw o zwiększonej odporności na utlenianie, przez wytworzenie warstwy aluminiowej zmodyfikowanej platyną – rozdział 6. Na drodze opracowanego procesu galwanicznego, obróbki dyfuzyjnej i zmodyfikowanego procesu aluminiowania, uzyskano warstwy Pt+Al, które charakteryzowały się najlepszymi właściwościami w przeprowadzonym teście cyklicznego utleniania, lepszymi niż stop Rene'N5. W oparciu o opracowane technologiczne podstawy procesu wytworzono demonstrator nowej technologii na łopatkę kierownicy turbiny silnika lotniczego.

Stwierdzić należy, że te zadania badawcze mają podstawowe znaczenie dla recenzowanej rozprawy doktorskiej, tak z punktu widzenia poznawczego, jak i praktycznego, są oryginalnym osiągnięciem naukowym niniejszej rozprawy oraz nadają jej charakter nowości naukowej. Uważam, że zakres opiniowanej pracy spełnia wymagania stawiane badaniom będącymi podstawą rozpraw doktorskich.

Cel pracy został potwierdzony, a celowość zastosowania wybranych parametrów procesu aluminiowania w procesie modyfikacji zewnętrznej warstw ochronnych okazała się zasadna.

Zaproponowane przez Autora rozprawy wnioski, są zgodne z wynikami eksperymentów oraz ich wcześniejszą analizą.

Podkreślić należy, iż treść rozprawy wskazuje, jej realizacja przebiegała zgodnie z przyjętym oraz dobrze przygotowanym i obszernym zakresem badań. Ponadto część doświadczalna rozprawy została szczegółowo usystematyzowana. Jest to niezbędne, gdyż obszar badawczy jest bardzo obszerny, a Autor pracy wykorzystał w nim wiele różnych metod badawczych. Z uwagi na złożony charakter zachodzących procesów, właściwy dobór metod miał decydujące znaczenie dla powodzenia pracy. Ponadto stwierdzić należy, że część badawcza rozprawy uwidacznia wyraźnie inwencję i dociekliwość Doktoranta.

#### 2.6. Oryginalność naukowa rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Łukasz Pyclika jest pracą oryginalną, mającą istotne znaczenie ze względów poznawczych i aplikacyjnych. Należy w tym miejscu podkreślić, że badania były realizowane w ramach programu Innolot, projekt Coopernik finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Avio Polska INNOLOT/1/11/NCBR/2014.

Oryginalnym elementem rozprawy jest zwiększenie żaroodporności warstw aluminidkowych wytworzonych na monokrystalicznym nadstopie niklu Rene’N5 w odniesieniu do warstw z procesu wyjściowego, co uzyskano poprzez modyfikację parametrów procesu aluminowania stosowanego w Firmie Avio Polska Sp. z o. o..

Podkreślić również należy, że tak wszechstronna i szczegółowa charakterystyka materiału badawczego zasługuje na uznanie. Uzyskane wyniki stanowią niewątpliwy dowód na przydatność zastosowanego rozwiązania do procesów modyfikacji użytkowych warstw ochronnych stosowanych w turbinach silników lotniczych.

#### 2.7. Stopień rozwiązania zagadnienia

Stopień rozwiązania zagadnienia oceniam, jako w pełni satysfakcjonujący. Dla udowodnienia celu pracy Autor wykonał badania, stosując wiele różnych metod badawczych niezbędnych do oceny budowy i określenia wybranych właściwości fizycznych oraz użytkowych wytwarzanych aluminidkowych warstw ochronnych.

Doktorant w trakcie realizacji pracy wykazał się sprawnością techniczną, co wymagało gruntownej Jego wiedzy w przedmiocie badań oraz dużej pomysłowości w rozwiązywaniu problemów technicznych.

#### 2.8. Układ treści i opracowania edytorskiego

Układ treści rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Łukasza Pyclika jest układem typowym

dla rozpraw doktorskich w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych. Drobnym mankamentem są występujące błędy stylistyczne i interpunkcyjne oraz występujące często określenia i nazewnictwo, które można określić jako tzw. „branżowe”. Struktura pracy jest prawidłowa, kolejność rozdziałów dobrana jest poprawnie. Należy podkreślić dobrą przejrzystość i czytelność rysunków.

## 2.9. Uwagi i zapytania

Ogólnie, wysoka ocena merytorycznej wartości rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Łukasza Pyclika nie zwalnia od pewnych uwag, które nasunęły się w czasie jej czytania.

Opisany w rozdziale 3 cel i zakres pracy wydają się jak już wcześniej sygnalizowałem zbyt zawężony tylko do modyfikacji warstw aluminiowych poprzez modyfikację parametrów procesu aluminiowania. Taka uwaga nasuwa się zwłaszcza po przytoczonym na str. 129 przez Autor niniejszej rozprawy stwierdzeniu cyt. **„Jednakże, uzyskane wyniki badań i ich analiza wskazują, że stop Rene‘N5 niepokrywany charakteryzuje się lepszą odpornością na cykliczne utlenianie niż materiał ten poddany procesowi aluminiowania dyfuzyjnego zgodnie z parametrami procesu zmodyfikowanego.** Założenie, iż można uzyskać znaczny wzrost odporności na cykliczne utlenianie próbek w stosunku do stopu podstawowego Rene‘N5 była motywacją prowadzenia dalszych prac nad rozwojem warstw o zwiększonej odporności na utlenianie”. Skutkowało to umieszczeniem w pracy rozdziału nr 6, w którym zamieszczono obszernie wyniki badań nad dalszym zwiększeniem odporności na utlenianie. Dlaczego badania przeprowadzone w tym rozdziale nie zostały ujęte w podstawowym zakresie badań, skoro wykonano demonstrator technologii w postaci pióra łopatką z żarowytrzymałego monokrystalicznego nadstopu niklu Rene‘N5 pokryty warstwą aluminiową modyfikowaną platyną oraz opracowana technologia warstw aluminiowych modyfikowanych platyną jest perspektywiczna z punktu widzenia Firmy Avio Polska.

Dlaczego omawiając mikrostrukturę warstwy aluminiowej uzyskanej w procesie niskoaktywnym (rozdział 4.3, str. 70, rys. 59) Autor niniejszej dysertacji umieścił zdjęcie z pozycji literaturowej nr 86, a nie zamieścił struktury z własnych badań?

Podrozdział 4.1.2 Obróbka cieplna elementów – bardzo enigmatycznie i niewystarczająco opisane. Rysunki 54 i 55 niczego nie wnoszą. Proszę o doprecyzowanie.

Nieprecyzyjnie opisany jest podrozdział 4.2 - zatytułowany Inspekcja wizualna próbek, cyt. „Każda próbka była poddana kontroli wizualnej na stanowisku wyposażonym w lampy o odpowiedniej mocy. Kontrolę wykonuje się okiem nieuzbrojonym. W przypadku wątpliwości używano lupy o powiększeniu 10x. Stwierdzono, że wszystkie próbki były ”zgodne” po

przeprowadzonej kontroli wizualnej”.

Wniosek nr 7, str. 145 cyt. „Zwiększenie właściwości warstwy aluminidkowej” – jakich właściwości?

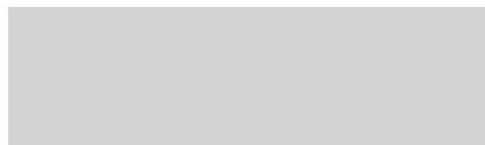
Stwierdzić również należy obecność błędów stylistycznych na przykład str. 101 cyt. „Badania niskocyklowego zmęczenia w wysokich temperaturach 1093°C wskazują na poprawę właściwości mechanicznych próbek spowodowaną obecnością warstwy aluminidkowe, ograniczającej degradację warstwy przypowierzchniowej przez utlenienia, głównie w miejscach węglików tworzących naturalne spiętrzenie naprężeń w materiale niepokrytym”.

### 3. Wniosek końcowy

Wymienione w recenzji uwagi nie obniżają wysokiej oceny merytorycznej tej pracy. Podsumowując opinię rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Pyclika stwierdzam, że tematyka rozprawy została trafnie wybrana z uwagi na jej naukową aktualność, a badania wniosły nowe treści, zarówno poznawcze jak i aplikacyjne.

Przedstawiony w pracy materiał, świadczy o dojrzałości naukowej Autora, który wykazał opanowanie interdyscyplinarnej wiedzy oraz wielu, w tym unikatowych, metod badawczych oraz umiejętności prowadzenia celowych i skutecznych badań. Zrealizował założony zakres pracy polegający na modyfikacji dotychczas stosowanego w Firmie Avio Polska procesu aluminowania oraz cel pracy w stopniu nie budzącym wątpliwości.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „*Technologiczne podstawy zwiększenia żaroodporności monokrystalicznego stopu Rene’N5*” spełnia wymagania określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 20 lipca 2018 r., z póź. zm. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dziennik Ustaw poz. 742) i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Łukasza Pyclika do publicznej obrony tej rozprawy.



Podpisał: dr hab. inż. Tadeusz Frączek, prof. PCz