

Poznań, 20 grudnia 2023 r.

**dr hab. inż. Dariusz Garbiec**

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny

ul. Ewarysta Estkowskiego 6

61-755 Poznań

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Pyclika  
pt. „Technologiczne podstawy zwiększania żaroodporności  
monokrystalicznego stopu Rene’N5”**

Podstawę do sporządzenia recenzji stanowi pismo Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej, prof. dr. hab. inż. Marii Sozańskiej o sygnaturze RDIMa.512.6.2023 RM.

**Wprowadzenie**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy 168 stron, zawiera 126 rysunków i 35 tabel. Podzielona jest w sposób klasyczny na przegląd literatury i wyniki badań własnych. Część literaturowa liczy 55 stron, a w jej skład wchodzi wstęp, analiza stanu wiedzy uwzględniająca wymagania stawiane elementom silników lotniczych, materiały wykorzystywane w ich konstrukcji, charakterystykę monokrystalicznego nadstopu niklu drugiej generacji Rene’N5, metody ochrony elementów turbin silników lotniczych, a całość tej analizy zakończona jest podsumowaniem. W tej części Doktorant przedstawił także cel i zakres pracy, uwzględniając zakres działalności firmy Avio Polska Sp. z o.o., charakterystykę materiału badawczego i definiując problem badawczy. Na część badań własnych, liczącą 84 strony, składa się metodyka badawcza, wyniki badań nad efektywnością osadzania warstw aluminiowych i badania nad dalszym zwiększaniem odporności na utlenianie. Całość zakończona jest wnioskami końcowymi i streszczeniem w języku polskim i angielskim. Doktorant powołał się w rozprawie na 92 pozycje literatury, jednakże tylko 26 z cytowanych prac zostały opublikowane w ostatnich 5 latach (2019–2023). Oznacza to, że choć temat z technologicznego

punktu widzenia jest interesujący, to z naukowego nie jest w ostatnich latach wiodącym w nauce o materiałach.

Cel rozprawy został poprawnie sformułowany, jednakże Doktorant nie postawił hipotez badawczych, co uważam za duży mankament tej pracy. W dalszej części recenzji chciałbym omówić poszczególne elementy rozprawy, wskazać jej słabsze strony oraz występujące błędy w terminologii jak i błędy językowe.

### **Ocena merytoryczna rozprawy**

Praca doktorska została zrealizowana pod opieką naukową dr. hab. inż. Bogusława Mendala, prof. PŚ i przy pomocy dr. inż. Radosława Swadźby w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” na podstawie umowy nr 01/RM/IM/DII/19 oraz projektu Coopernik finansowanego w ramach programu InnoLot na podstawie umowy nr INNOLOT/I/11/NCBR/2014.

Motywacją do podjęcia tego zagadnienia była analiza zużycia aluminiowanych kierownic turbiny niskiego ciśnienia silnika GE9X produkcji firmy General Electric po eksploatacji, która wykazała, że stosowana dotychczas technologia dyfuzyjnego aluminiowania jest niewystraszająca do zachowania wymaganej trwałości w warunkach eksploatacji. Stąd też zdefiniowano cel pracy, którym 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. Cel ten został zrealizowany poprzez odpowiednie kształtowanie mikrostruktury warstw aluminidkowych z wykorzystaniem metody „out-of-pack” i modyfikacji tych warstw w skali laboratoryjnej i przemysłowej, co z kolei stanowi dużą wartość tej pracy. Co istotne z wdrożeniowego punktu widzenia, to w wyniku przeprowadzonych badań określono parametry procesowe, które posłużą do modyfikacji aktualnie realizowanego procesu w firmie Avio Polska Sp. z o.o.

Na wstępie Doktorant dokonał charakterystyki materiału w stanie niepokrytym oraz materiału z warstwą aluminidkową wytworzoną w standardowym procesie produkcyjnym stosowanym w firmie Avio Polska Sp z o.o. Za pewną niedogodność i w pewnym sensie odstępstwo od kanonu uznaję pomieszczenie metodyki badawczej z wynikami badań wstępnych. Te dwa rozdziały powinny być od siebie oddzielone, a nie połączone.

W pracy Doktorant udowodnił, że grubość warstw aluminidkowych, ich morfologia oraz zawartość aluminium zależy od parametrów procesu, takich jak czas trwania fazy aktywnej,



temperatura procesu w fazie aktywnej, ciśnienie w retorcie, przepływ argonu, który jest gazem procesowym oraz składu chemicznego złoża (aktywatora i donora), konstrukcji komory roboczej i sposobu ułożenia oraz ilości części poddawanych obróbce w jednym procesie. Wytworzone warstwy aluminidkowe na nadstopie Rene'N5 uzyskane w zmodyfikowanym procesie odznaczały się zwiększoną zawartością aluminium wynoszącą 34,7% mas. i grubością warstwy wynoszącą 68  $\mu\text{m}$ . W materiale wytworzonym w standardowym procesie zawartość aluminium wynosiła 30,6% mas., a grubość warstwy 53  $\mu\text{m}$ . W konsekwencji uzyskano zwiększenie żaroodporności warstw aluminidkowych. Materiał wytworzony w zmodyfikowanym procesie odznacza się dwukrotnie większą odpornością na utlenianie w odniesieniu do materiału z warstwą standardową, gdzie kryterium oceny jest ilość przeprowadzonych cykli utleniania w temperaturze 1100°C i czasie trwania cyklu 23 h, po których próbka wraca do swojej masy początkowej. Całkowita zmiana masy próbek po 100 cyklach utleniania została zmniejszona o 23%. Ponadto, w wyniku przeprowadzonych badań zmęczeniowych w temperaturze 649°C, 871°C i 1093°C nie wykazano pogorszenia się właściwości zmęczeniowych. Co istotne, nie zauważono poprawy odporności na cykliczne utlenianie nadstopu z warstwą aluminidkową w odniesieniu do materiału bez warstwy, jednakże pozwoliło to uniknąć utleniania tego stopu (materiału bazowego). W efekcie polepszeniu uległy właściwości mechaniczne powyżej temperatury przejścia między stanem kruchym i ciągliwym, co skutkuje zwiększoną żaroodpornością. W ostatnim kroku Doktorant wytworzył warstwy aluminidkowe zmodyfikowane platyną. W tym przypadku uzyskano warstwy o grubości 107  $\mu\text{m}$  i zawartości aluminium wynoszącej 30,8% mas. oraz platyny wynoszącej 20,7% mas. oraz dwustrefową morfologią. To właśnie ten materiał odznacza się najlepszymi właściwościami. Ilość cykli, po których próbka wraca do swojej masy początkowej w teście cyklicznego utleniania wzrosła 15-krotnie w odniesieniu do próbek z warstwą standardową. Biorąc pod uwagę zmianę masy próbek po 100 cyklach, uległa ona zmniejszeniu o 90%. Nadstop Rene'N5 ze zmodyfikowaną platyną warstwą aluminidkową odznacza się porównywalną wytrzymałością zmęczeniową w podwyższonej temperaturze, jak stop bez warstwy oraz z warstwą standardową. Można zatem stwierdzić, że grubość warstwy aluminidkowej oraz obecność fazy wtórnej  $\text{PtAl}_2$  nie pogarsza właściwości mechanicznych próbek. Biorąc pod uwagę charakter doktoratu wdrożeniowego, Doktorant wytworzył demonstrator pióra łopatki z nadstopu Rene'N5 pokrytego zmodyfikowaną platyną warstwą aluminidkową. Dalsze prace realizowane przez firmę Avio Polska Sp. Z o.o. dotyczyć będą



wpływu parametrów procesu na jednorodność uzyskiwanej mikrostruktury w częściach o złożonej geometrii.

Przechodząc do części, w której omówię mankamenty pracy, chciałbym zaznaczyć, że nie mam krytycznych uwag merytorycznych do przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników, przy czym chciałbym zauważyć, że ilość błędów językowych i edytorskich jest dużo większa niż w innych ocenianych do tej pory przeze mnie pracach doktorskich. Za duży mankament pracy uważam przedstawianie rysunków z opisami w języku angielskim. Praca została napisana w języku polskim i wszystkie informacje przedstawione na rysunkach powinny być także przedstawione w języku polskim. Doktorant nie zawsze posługuje się precyzyjnie językiem polskim technicznym. Nie możemy mówić o temperaturach, tylko o temperaturze, która przyjmuje różne wartości. Doktorant myli pojęcia struktury i mikrostruktury, na przemian posługuje się pojęciem własności i właściwości, waga i masa, nie stosuje odstępów w zapisie wartości i jednostki. W języku polskim pomiędzy wartością i jednostką zawsze jest odstęp, np. 1 ppm, zamiast 1ppm. Wyjątek stanowi jedynie zapis stopnia ( $^{\circ}$ ) i stopnia Celcjusza ( $^{\circ}\text{C}$ ), gdzie nie ma odstępów pomiędzy wartością i jednostką. W kwestii jednostek Doktorant nie stosuje jednostek ani układu SI, ani jednostek stosowanych przez inżynierów, czego rażącym przykładem jest podawanie ciśnienia w jednostce ksi oraz długości w jednostce cm. W języku polskim wartości dziesiętne, setne itd. podawane są po przecinku, a nie po kropce jak w języku angielskim. Doktorant stosuje raz system polski, a raz angielski. Cytowania czasami są przedstawiane w nawiasach okrągłych, jak np. (35) na stronie 28, a czasami w nawiasach kwadratowych, jak np. [36] na tej samej stronie. Często w pracy spotkałem się ze stosowaniem języka potocznego, jak np. „...próbek i elementów...”, „...na warsztacie...” na stronie 66, co w pracy doktorskiej absolutnie nie powinno mieć miejsca. Na rys. 17, gdzie przedstawiono mikrostrukturę nadstopu Rene’N5 brakuje markera skali. W opinii recenzenta bezcelowym jest przedstawianie danych na rysunkach, które w żaden sposób nie są dyskutowane. Dobrym przykładem takiego działania jest rys. 54, 56 czy 64. Bezcelowym jest także przedstawianie zdjęć mikroskopu jak na rys. 58, czy stanowiska do badania utleniania przedstawionego na rys. 63. Na stronie 90 Doktorant napisał, że „otrzymane wartości są w zakresie spodziewanych wyników bazujących na doświadczeniach w Avio Polska”. To zdanie niczego nie wnosi, gdyż nie wiadomo jakie to są „spodziewane wyniki”. Takie nieprecyzyjne sformułowania w pracy doktorskiej są nie do przyjęcia. Proszę o szczegółowe wskazanie jakie wartości są zgodne ze standardami przyjętymi w firmie oraz jakie to są standardy. Z uwagi na fakt, że praca nie ma

charakteru niejawnego, takie informacje powinny zostać przedstawione, aby móc rzetelnie ocenić jej wartość. Proszę o przedstawienie stosownych uzupełnień przed publiczną obroną.

### **Podsumowanie**

Uzyskane przez Doktoranta wyniki badań są nowe i oryginalne. Chciałbym jednoznacznie stwierdzić, że wszystkie wskazane przeze mnie w niniejszej recenzji błędy czy niedociągnięcia nie zmieniają mojego pozytywnego odbioru pracy, a mają na celu poprawę warsztatu naukowego Doktoranta. Podsumowując, przedstawiona do recenzji rozprawa spełnia wszystkie kryteria stawiane rozprawom doktorskim określone Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Łukasza Pyclika do publicznej obrony.

Dariusz Gubiec