



**Politechnika Warszawska**  
Wydział Inżynierii Materiałowej

Warszawa, 01.02.2024 r.

dr hab. inż. Ryszard Sitek, prof. uczelni

e-mail: [ryszard.sitek@pw.edu.pl](mailto:ryszard.sitek@pw.edu.pl)

OCENA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Pytel

*pt. Wpływ obróbki mechanicznej i morfologii wydzielen węglików w żarowytrzymałych stopach odlewniczych ŻS6U-WI na własności zmęczeniowe Łopatek I Stopnia Turbiny Sprężarki stosowanych w produkcji lotniczej*

Recenzja sporządzona na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa dr hab. inż. Macieja Motyki, prof. PRz z dnia 15.11.2023 r.

**Ogólna charakterystyka pracy**

Recenzowana rozprawa doktorska zrealizowana została we współpracy z Pratt&Whitney Rzeszów S.A. w ramach programu „doktorat wdrożeniowy” pod opieką naukową dr hab. inż. Andrzeja Nowotnika, prof. PRz. Głównym celem prowadzonych badań było „opracowanie parametrów technologii wytwarzania gotowych łopatek ze stopu ŻS6U-WI z zachowaniem wysokich standardów jakościowych zapewniających bezpieczną ich eksploatację w silniku lotniczym”. Praca jest dosyć obszerna, obejmuje 158 stron, podzielona została na pięć rozdziałów w tym bibliografia. Zawiera również streszczenie w języku polskim i angielskim. W przeglądzie literaturowym Doktorantka sformułowała tezę pracy, omówiła konstrukcję silnika PZL 10W produkowanego w zakładzie Pratt&Whitney Rzeszów S.A., ze wskazaniem warunków pracy łopatek pierwszego stopnia turbiny sprężarki będących przedmiotem badań. Scharakteryzowała również budowę i rodzaje łopatek stosowanych na turbinę sprężarki, technologie i materiały, z jakich są wytwarzane oraz stosowane obróbki. Następnie podsumowała stan zagadnienia, sformułowała drugą tezę pracy, scharakteryzowała materiał użyty do badań oraz zastosowane metody badawcze. W kolejnym rozdziale przedstawiła wyniki badań wraz z ich dyskusją. Wyniki badań Doktorantka podsumowała wnioskami o charakterze poznawczym i praktycznym, omówiła zmiany wdrożone w technologii łopatek. Autorka w pracy



## **Politechnika Warszawska**

### **Wydział Inżynierii Materiałowej**

powołuje się na 98 pozycji literaturowych, ściśle związanych z tematem pracy. W mojej opinii zawarty w pracy przegląd literatury jest właściwy, chociaż mógłby być poszerzony o prace naukowe z ostatnich 5 lat.

#### **Ocena doboru tematyki i zakresu pracy**

Wzrost sprawności nowoczesnych silników lotniczych, ich wytrzymałość, trwałość i niezawodność w dużej mierze uwarunkowana jest rozwiązaniami konstrukcyjnymi i rozwojem materiałów żaroodpornych i żarowytrzymałych. Szczególnie łopatki turbin sprężarek pierwszego stopnia będące przedmiotem badań naukowych są narażone na degradację w wyniku oddziaływania korozji wysokotemperaturowej, zmęczenia cieplnego czy też zużycia erozyjnego. Dotychczas prowadzone prace badawcze skupiają się m.in. na opracowaniu nowych lub ulepszaniu już istniejących stopów niklu, z których odlewane są – metodą precyzyjnego odlewania w próżni – gorące części silników lotniczych. Ważnym zabiegiem technologicznym mającym wpływ na właściwości użytkowe odlanych części z nadstopów niklu są obróbki cieplne, cieplno-chemiczne oraz obróbki strumieniowo-ściernie i wykańczające obróbki mechaniczne. Celem obróbek cieplnych polegających na przesycaniu i starzeniu jest poprawa właściwości mechanicznych w całej objętości obrabianych detali. Z kolei powierzchniowe obróbki cieplno-chemiczne umożliwiają wytworzenie żarowytrzymałych warstw, które chronią materiał podłoża przed oddziaływaniem agresywnego środowiska gazowego w wysokiej temperaturze. Ważną częścią procesu wytwarzania gorących części silników lotniczych są także obróbki strumieniowo-ściernie (np. kulowanie) lub mechaniczne (frezowanie, szlifowanie, polerowanie itp.). Poprzez odpowiedni dobór obróbek strumieniowo-ściernych i mechanicznych, możliwe jest osiągnięcie założonej dokładności geometrycznej, tolerancji wymiarowej oraz jakości wierzchniej warstwy odlewu.

Doktorantka w pracy przeprowadziła kompleksowe badania polegające na szczegółowej analizie: wpływu składu chemicznego dostarczonego stopu niklu ŻS6U-WI (Masterheat), warunków procesu odlewania, obróbki cieplnej (przesycania), cieplno-chemicznej (proces aluminiowania) oraz obróbki strumieniowo-ścierniej (kulowania) i mechanicznej (szlifowania i polerowania) na mikrostrukturę i właściwości użytkowe łopatek pierwszego stopnia turbiny sprężarki stosowanych w silniku PZL 10W. W tym zakresie dotychczasowa wiedza jest dosyć ograniczona, co potwierdza słuszność przyjętej przez Doktorantkę tematyki badań. Należy zatem stwierdzić, że tematyka rozprawy



## Politechnika Warszawska

Wydział Inżynierii Materiałowej

doktorskiej jest jak najbardziej aktualna i uzasadniona nie tylko z punktu widzenia naukowego, ale przede wszystkim praktycznego, wdrożenia ulepszonej technologii łopatek do praktyki przemysłowej. Dobór tematyki uważam za słuszny, natomiast zakres prowadzonych badań za obszerny.

### Ocena merytoryczna pracy

Rozprawę doktorską Pani mgr inż. Anny Pytel oceniam bardzo pozytywnie. Należy podkreślić, że Doktorantka w stosunkowo krótkim czasie (studia doktoranckie standardowo trwają cztery lata) podjęła się rozwiązania złożonego problemu badawczego, jakim było opracowanie i wdrożenie do praktyki przemysłowej ulepszonej technologii łopatek pierwszego stopnia turbiny sprężarki stosowanych w silniku lotniczym PZL-10W. Zakres oraz poziom prowadzonych badań wskazuje, że Doktorantka posiada szeroką wiedzę naukową i praktyczną. Za największe osiągnięcie Autorki uważam:

1. Zoptymalizowanie udziału chromu w stopie niklu ŻS6U-WI, z którego wykonano odlewy do dalszych badań. Obniżenie zawartości chromu spowodowało ograniczenie powstawania kruchych węglików i miało wpływ na poprawę właściwości mechanicznych odlanych elementów.
2. Opracowanie parametrów technologicznych procesu odlewania i obróbki cieplnej, polegającej na przesycaniu. Opracowane parametry technologiczne dla procesu odlewania i przesycania (bez stosowania dodatkowej obróbki umacniającej tj. procesu starzenia) umożliwiły otrzymanie detali o jednorodnej mikrostrukturze i wysokich właściwościach użytkowych spełniających normy obowiązujące w firmie Pratt&Whitney Rzeszów S.A.
3. Opracowanie parametrów technologicznych procesu dla obróbki strumieniowo-ściernej (kulowania) oraz wykańczających obróbek mechanicznych tj. szlifowania i polerowania. Opracowane warunki dla w/w obróbek umożliwiły poprawę właściwości użytkowych w zewnętrznej strefie obrabianych detali oraz uzyskanie wymaganej jakości ich powierzchni.

Podsumowując, stwierdzam, że zaplanowane w pracy eksperymenty oraz w większości interpretacja wyników zostały wykonane poprawnie i jako całość stanowią skrupulatne, obszerne opracowanie tematu. W konsekwencji, umożliwiły zrealizowanie założonych celów. Po kilkukrotnej i dogłębnej lekturze pracy doktorskiej będącej, przedmiotem mojej recenzji nasuwają się jednak pewne uwagi, które zamieszczam poniżej:



### Uwagi merytoryczne i dyskusyjne

1. Na stronie 4 w oparciu o dane literaturowe i wyniki badań własnych Doktorantka sformułowała tezę pracy „Możliwe jest wytworzenie łopatek pierwszego stopnia turbiny o prognozowanych własnościach zmęczeniowych, przy zastosowaniu odpowiednich parametrów procesu obróbki mechanicznej i poprzez kształtowanie odpowiedniej morfologii wydzielen węglików w mikrostrukturze łopatek wytwarzanych z żarowytrzymałego stopu odlewniczego ŻS6U-WI”. Natomiast na stronie 42 po uwzględnieniu statystyk produkcyjnych analiz danych literaturowych i wyników dotychczasowych badań własnych Doktorantka sformułowała kolejną tezę pracy „Parametry procesów produkcyjnych w technologii wytwarzania Łopatek Turbiny Sprężarki I Stopnia z odlewniczego nadstopu niklu ŻS6U-WI determinują wytrzymałość zmęczeniową oraz jakość finalnego wyrobu gwarantującą prawidłową i bezpieczną ich pracę w warunkach cyklicznych obciążeń cieplnych i mechanicznych. Możliwe jest zatem, zidentyfikowanie i ostateczne wyeliminowanie krytycznych, dla jakości łopatek, wszelkich odchyłek materiałowych i konstrukcyjnych poprzez zastosowanie nowoopracowanych procedur naprawczych na etapie kontroli i analizy cyklu produkcyjnego w systemie: I etap - odlewanie, II etap -procesy specjalne, III etap - obróbka mechaniczna, IV etap - kulowanie, zapewniając uzyskanie produktu spełniającego wysokie wymagania jakościowe odbiorców części stosowanych w produkcji silników lotniczych”. Powstaje więc pytanie, z czego wynika i czemu ma służyć postawienie dwóch tez w jednej rozprawie doktorskiej? W mojej ocenie zachodzi konieczność doprecyzowania ich zasadności, ponieważ w pracy brak jest uzasadnienia.
2. „Metodyka badań: I etap-proces wytworzenia półwyrobu (odlewanie), II-etap procesy specjalne (obróbka cieplna – przesycanie, obróbka cieplno-chemiczna – aluminiowanie i renoalumiowanie), III-etap- obróbka strumieniowo-ścierna (kulowanie), IV etap – powierzchniowa obróbka wykańczająca (obróbka mechaniczna)” (str. 43)– Etap III i IV jest niezgodny z tezą pracy, brak jest również uzasadnienia z czego wynikała w pracy taka kolejność prowadzonych badań.
3. „Wysokie własności żarowytrzymałe stop ten uzyskuje po obróbce cieplnej składającej się tylko z operacji przesycania, poprzez chłodzenie w powietrzu”. „Starzenie przesyconego stopu ŻSU-WI nie poprawia znacząco jego własności mechanicznych”. (str. 19). Nasuwa się pytanie, czy zastosowane warunki były odpowiednio dobrane dla procesu przesycania i/lub starzenia?



## Politechnika Warszawska

Wydział Inżynierii Materiałowej

4. Brak jest informacji, jaką metodą wytwarzane były warstwy aluminidkowe modyfikowane renem, brak jest uzasadnienia, dlaczego warstwy modyfikowano akurat renem, a nie np. platyną.
5. „Łopatki w stanie lanym charakteryzują się dendrytyczną osnową austenityczną  $\gamma$ , w której widoczne są drobne o dużym stopniu dyspersji wydzielenia fazy umacniającej  $\gamma''$ , węgliki typu  $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$  oraz cząstki pierwotnej fazy  $\gamma''$ ” (str. 113), w pracy brak jest jednak informacji, na jakiej podstawie stwierdzono występowanie fazy  $\gamma''$ .
6. „Kolejnym etapem w technologii wytwarzania gotowych łopatek po procesie aluminowania jest proces obróbki cieplnej, podczas której zachodzi reakcja przemiany w warstwie aluminidkowej  $\delta\text{-Ni}_2\text{Al}_3$  w fazę  $\beta\text{-NiAl}$ ” (str. 122). W pracy brak jest jednak informacji potwierdzających występowanie tych faz.
7. Tabela 40, strona 129 przedstawia w sposób nieczytelny warunki procesów wytwarzania łopatek, np. temperatura wyżarzania I, temperatura wyżarzania II – nie jest wiadome, czego te procesy dotyczą, ponieważ brak jest wyjaśnienia w tekście.
8. We wniosku Doktorantka stwierdza, że „Efektem wykonanych badań było wprowadzenie do praktyki odlewniczej nowego stopu (Masterheat II)”. W mojej ocenie należałoby jednak stwierdzić raczej „ulepszony stopu”, ze względu na obniżenie zawartości chromu w stopie.
9. „Parametry obróbki cieplnej tj. przesycań i starzenia odlanych detali ze stopu ŻŚU-WI powinny być opracowane na podstawie badań kalorymetrycznych (np. różnicowej analizy cieplnej DTA)” – powinno być raczej tylko „przesycań odlanych detali ze stopów” ponieważ w pracy Doktorantka nie prowadziła procesu starzenia.
10. „Zastosowanie procesu kulowania oraz procesów obróbki mechanicznej nie ma znaczącego wpływu na twardość, mierzoną na powierzchni odlewów łopatek ze stopu ŻŚU-WI.” W mojej opinii wniosek powinien być bardziej precyzyjny i zawierać informację jaką metodą i przy jakim obciążeniu wgłębnika prowadzono badanie.

### Inne uwagi

Doktorantka nie uniknęła również błędów, takich jak:

1. Po tytule pracy nie stawia się kropki, podobnie jak w podpisach pod rysunkami np. „Rys. 1. Przekrój silnika PZL-10W.”



## Politechnika Warszawska

Wydział Inżynierii Materiałowej

2. „Materiały, z których wytwarzane są łopatki turbiny silników lotniczych muszą spełniać wysokie wymagania żarowytrzymałe i żaroodporne” (str. 10)- należałoby raczej użyć sformułowania „Materiały, z których wytwarzane są łopatki turbiny silników lotniczych muszą spełniać wysokie wymagania żaroodporne i żarowytrzymałe”.
3. „Maksymalna głębokość warstwy aluminikowej po próbie długotrwałego wynosi 0,064 mm.” (str. 118) – powinno być: „Maksymalna głębokość warstwy aluminikowej po próbie długotrwałego utleniania wynosi 0,064 mm”.
4. „Badania mikrostruktury powłoki” (str. 49) – powinno być „Badania mikrostruktury warstwy”.
5. Brak odniesienia się w tekście do rysunków 38-41.

Powyżej wspomniane uwagi nie zaniżają ogólnej wartości pracy. Większość z nich przekazałem Doktorantce podczas spotkania online.

### Ocena końcowa

Biorąc pod uwagę wartość naukową i praktyczną rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Anny Pytel stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789 z późn. zm.), a także spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.). W związku z tym wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Rzeszowskiej o dopuszczenie do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Anny Pytel.

Ryszard Sitek