



**Politechnika
Śląska**

PRACA DOKTORSKA

**Technologiczne podstawy zwiększenia żaroodporności
monokrystalicznego stopu Rene'N5**

mgr inż. Łukasz Pyclik

**Wydział Inżynierii Materiałowej
Wspólna Szkoła Doktorska**

PROMOTOR

**dr hab. inż. Bogusław Mendala, prof. PŚ
Katedra Technologii Materiałowych**

PROMOTOR POMOCNICZY

dr inż. Radosław Swadźba

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytutu Technologiczny

GLIWICE 2023

Streszczenie

Tytuł pracy:

Technologiczne podstawy zwiększenia żaroodporności monokrystalicznego stopu Rene'N5

Streszczenie:

Materiały stosowane na elementy konstrukcyjne pracujące w strefie gorącej silników lotniczych muszą charakteryzować się wysoką żaroodpornością, dlatego wykonuje się je z nadstopów niklu. W celu zwiększenia odporności na utlenianie tych materiałów stosuje się warstwy lub powłoki ochronne. Najszerzej wykorzystywanymi warstwami ochronnymi na elementy w strefie przepływu gazów turbiny silnika lotniczego są konwencjonalne warstwy aluminidkowe. Obecnie wiodącymi metodami wytwarzania warstw aluminidkowych są metody gazowe (CVD) i „out-of-pack”. Dostępna literatura obszernie charakteryzuje wpływ warstw ochronnych i ich właściwości na zróżnicowane czynniki środowiskowe, jednakże podaje się tylko część kluczowych parametrów procesu aluminowania dyfuzyjnego, a dostępne pozycje skupiają się na badaniach podstawowych, prowadzonych na instalacjach w skali laboratoryjnej, na prostych geometrycznie próbkach. Brak jest natomiast informacji lub pojawiają się one w bardzo ograniczonej formie, dotyczących prób prowadzonych na instalacjach przemysłowych oraz elementach, np. łopatkach i kierownicach turbiny silnika lotniczego.

Głównym celem pracy było zwiększenie żaroodporności warstw aluminidkowych wytwarzanych na monokrystalicznym nadstopie niklu Rene'N5, uważanym za jeden z najbardziej odpornych na utlenianie stopów wysokotemperaturowych stosowanych komercyjnie. Motywacją do podjęcia tematu była analiza stanu technicznego aluminowanych kierownic turbiny niskiego ciśnienia silnika GE9X po eksploatacji, która wykazała, że stosowana dotychczas technologia dyfuzyjnego aluminowania jest niewystarczająca dla zachowania wymaganej trwałości tak odpowiedzialnych komponentów w warunkach eksploatacji.

Dokonano charakterystyki materiału w stanie niepokrytym oraz materiału z warstwą aluminidkową z procesu wyjściowego, stosowanego standardowo. Przeprowadzone badanie cyklicznego utleniania w temperaturze 1100°C w cyklach 23 godzinnych wykazały wyższą odporność nadstopu niepokrytego w stosunku do aluminowanego według aktualnie stosowanej technologii, pod kątem kryterium zmiany masy próbek. Jednocześnie analiza

mikrostrukturalna po 10, 50 i 100 cyklach testu ujawniła nieciągłości mikrostruktury materiału niepokrytego, w postaci tlenków, w miejscach o dużej segregacji Hf, Y i Ta, podczas gdy materiał z warstwą aluminidkową uzyskaną w procesie wyjściowym wykazywał brak produktów korozji w warstwie i materiale podłoża. Wyniki testu izotermicznego utleniania w temperaturze 1100°C po 3000h badań również potwierdziły ten wniosek. Badania niskocyklowego zmęczenia w temperaturze 1093°C wykazały poprawę właściwości mechanicznych próbek spowodowaną obecnością warstwy aluminidkowej, ograniczającej degradację warstwy przypowierzchniowej przez utlenienie, głównie w miejscach występowania węglików powodujących naturalne spiętrzenia naprężeń w materiale niepokrywanym.

Przedmiotem prowadzonych w pracy badań było kształtowanie mikrostruktury warstw aluminidkowych wytwarzanych metodą „out-of-pack” w procesie niskoaktywnym, wysokotemperaturowym, na instalacjach w skali laboratoryjnej i przemysłowej. Przeprowadzone próby technologiczne pozwoliły na określenie wpływu kluczowych parametrów procesu aluminowania, do których należą: rodzaj złoża, sposób obróbki cieplnej, przestrzeń robocza urządzeń, jakość powierzchni obrabianych elementów oraz ich geometria.

Bazując na wynikach prób technologicznych, zmodyfikowano parametry procesy aluminowania i przeprowadzono ich weryfikację na instalacji przemysłowej, uzyskując zmodyfikowaną warstwę aluminidkową o dwukrotnie wyższym rezerwarze Al niż w warstwie z procesu wyjściowego. Przełożyło się to na dwukrotne zwiększenie ilości cykli, po których próbki ze zmodyfikowaną warstwą aluminidkową wróciły do masy początkowej w badaniach cyklicznego utleniania. Przeprowadzone badania wytrzymałości zmęczeniowej pozwoliły stwierdzić, że wzrost grubości i zawartości Al w zmodyfikowanej warstwie aluminidkowej nie przełożyły się na pogorszenie właściwości mechanicznych w przebadanym zakresie temperatury.

Uzyskane wyniki badań i ich analiza wskazują, że stop Rene’N5 niepokrywany charakteryzuje się lepszą odpornością na cykliczne utlenianie niż materiał ten poddany procesowi aluminowania dyfuzyjnego według parametrów procesu zmodyfikowanego. Przyjęto założenie, iż można uzyskać znaczny wzrost odporności na cykliczne utlenianie próbek w stosunku do stopu podstawowego Rene’N5, co była główną motywacją prowadzenia dalszych prac nad rozwojem warstw o zwiększonej odporności na utlenianie, przez wytworzenie warstwy aluminidkowej zmodyfikowanej platyną, w procesie dwuetapowym. 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.

Słowa kluczowe:

nadstopy niklu, warstwy ochronne, łopatki kierujące, silnik lotniczy.

Abstract

Thesis title:

Technological principles of increasing the heat resistance of single crystal Rene'N5 alloy

Abstract:

The materials for hot section components in aircraft engines must characterize brilliant heat resistance, therefore are made from nickel-base superalloys. To avoid high temperature corrosion impact, the protective coatings are applied to the substrate. The most common protective coatings for turbine blades and nozzles are conventional aluminide coatings. Currently, chemical vapour deposition and out-of-pack methods are most widely used in the aviation industry. The available literature data describe influence of coatings and their properties on corrosion, sufficiently. However, there are only partial know-how about key coating process parameters, and literature experiments are focused on fundamental research in laboratory scale furnaces done on simple geometry samples. There is lack or just few of data showing correlations between laboratory and industrial scale installations, especially for real components.

The main purpose of the thesis was increasing the heat resistance of single crystal Rene'N5 alloy, current the best material for oxidation resistance applied in commercial aircraft engines. The motivation to take the topic was the evaluation of aluminide coated nozzles from GE9X low pressure turbine after exposure, which revealed that current coating is insufficient.

The research started from characterization of bare and coated material. The coating was obtained in initial process developed by Avio Polska. Cyclic oxidation tests done at 1100°C in 23-hour cycles shown bare material is better than coated considering mass change criterium. Simultaneously, microstructure analysis after 10, 50 and 100 cycles exhibited frontal oxidation in area with Hf, Y and Ta segregation for bare material, while material coated in initial process shown absence of corrosion product below top layer of additive zone. Additionally, the results from isothermal oxidation at 1100°C after 3000h confirmed above. Low cycle fatigue evaluation at 1093°C highlighted improvement in mechanical properties for coated samples, where base material degradation was mitigated by coating presence. Frontal oxidation through tantalum carbide was eliminated leading to reduction of high-stress concentration areas.

The research focused on aluminide coating microstructure modelling in „out-of-pack”, low-activity, high-temperature processes on laboratory and industrial scale installation. The technological trials allowed to determine impact of key process parameters like donor, activator, heat treatment, working zone of the furnace, quality of surface to coat and components geometry.

Based on above relationships, initial process parameters were changed. The modified process was validated on industrial scale installation obtaining modified aluminide coating rich in Al two times better than initial one, what led to increasing of oxidation resistance twice considering criterium of sample mass change to initial one. Low cycle fatigue tests result shown no detrimental impact of growth of aluminide coating thickness and Al content on mechanical properties in evaluated range.

However, the results for coatings from both initial and modified processes shown bare material characterized by better oxidation resistance in cyclic oxidation testing considering mass change criterium. Therefore, it was decided to continue the research and went outside conventional aluminide coating family.

It was the motivation to develop aluminide coating modified by platinum. To meet this goal, galvanic process and diffusion heat treatment were defined. Those operations together with modified aluminide coating process were used to coat samples. Cyclic oxidation testing shown material with aluminide coating modified by platinum was significantly better than both previous tested simple aluminide coatings and bare material considering mass change criterium. Based on that, technology demonstration was performed by coating application on nozzle airfoil.

Keywords:

Nickel based superalloys, protective coatings; nozzle guide vanes; aircraft engine.