



**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 aluminowania, 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.