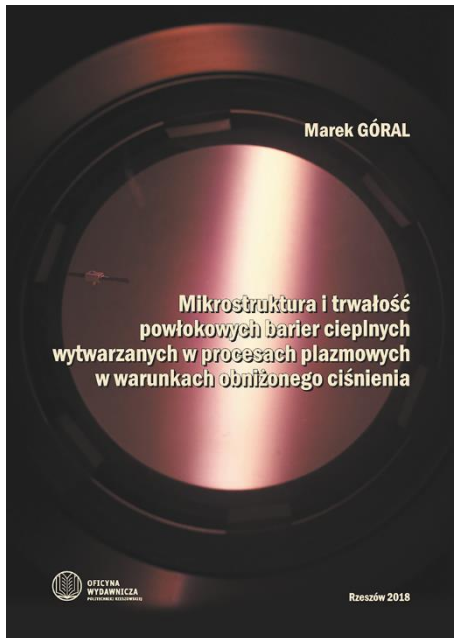


# Mikrostruktura i trwałość powłokowych barier cieplnych wytwarzanych w procesach plazmowych w warunkach obniżonego ciśnienia

Marek Góral



monografia

słowa kluczowe: *powłokowe bariery cieplne, natryskiwanie cieplne, warstwy żaroodporne, silniki lotnicze, nadstopy niklu, LPPS, PS-PVD, aluminiowanie*

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2018

ISBN 978-83-7934-267-9

136 stron

format B5

oprawa miękka

cena 35,00 zł

## SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych skrótów

Wprowadzenie

### 1. Analiza literatury

- 1.1. Ogólna charakterystyka warstw żaroodpornych i powłokowych barier cieplnych
  - 1.1.1. Międzywarstwy na osnowie wieloskładnikowego stopu MCrAlY natryskiwane cieplnie
  - 1.1.2. Dyfuzyjne warstwy aluminiokowe
  - 1.1.3. Warstwy ochronne powstające po aluminiowaniu międzywarstwy metalicznej MCrAlY
  - 1.1.4. Zewnętrzna warstwa ceramiczna
- 1.2. Procesy natryskiwania plazmowego w warunkach obniżonego ciśnienia
  - 1.2.1. Ogólna charakterystyka procesu LPPS/VPS
  - 1.2.2. Hybrydowe procesy natryskiwania plazmowego
  - 1.2.3. Natryskiwanie plazmowe cienkich warstw – LPPS Thin Film
  - 1.2.4. Chemiczne osadzanie z fazy gazowej z odparowaniem za pomocą palnika plazmowego – PS-CVD
- 1.3. Fizyczne osadzanie z fazy gazowej z odparowaniem za pomocą palnika plazmowego PS-PVD
  - 1.3.1. Ogólna charakterystyka procesu PS-PVD
  - 1.3.2. Warunki tworzenia się warstwy ceramicznej YSZ w procesie PS-PVD
  - 1.3.3. Właściwości powłokowych barier cieplnych TBC – warstwa ceramiczna wytworzona w procesie PS-PVD
  - 1.3.4. Urządzenia do procesu PS-PVD
  - 1.3.5. Nowe tendencje w rozwoju procesu PS-PVD
- 1.4. Podsumowanie przeglądu piśmiennictwa

### 2. Teza, cel i zakres pracy

3. Materiał i metodyka badań
    - 3.1. Materiał podłoża
    - 3.2. Materiał do natryskiwania metalicznej międzywarstwy MCrAlY powłokowej bariery cieplnej
    - 3.3. Materiał ceramiczny zewnętrznej warstwy powłokowej bariery cieplnej
    - 3.4. Urządzenie do natryskiwania plazmowego w warunkach obniżonego ciśnienia LPPS-Hybrid
    - 3.5. Metodyka badań
  4. Technologia powłokowych barier cieplnych w warunkach obniżonego ciśnienia
    - 4.1. Proces natryskiwania międzywarstwy MCrAlY w warunkach obniżonego ciśnienia – dobór warunków
    - 4.2. Wytwarzanie warstwy ceramicznej YSZ w procesie PS-PVD – dobór warunków
    - 4.3. Oddziaływanie materiału podłoża na kształtowanie mikrostruktury i degradację powłokowych barier cieplnych wytwarzanych w warunkach obniżonego ciśnienia
      - 4.3.1. Technologia powłokowej bariery cieplnej
      - 4.3.2. Podłoże – nadstop Inconel 617
      - 4.3.3. Podłoże – nadstop Rene 80
      - 4.3.4. Podłoże – nadstop CMSX-4
      - 4.3.5. Podsumowanie
  5. Mikrostruktura i odporność na utlenianie powłokowych barier cieplnych wytworzonych w procesach natryskiwania plazmowego w warunkach obniżonego ciśnienia
    - 5.1. Mikrostruktura, skład chemiczny i fazowy dwuwarstwowej powłokowej bariery cieplnej
    - 5.2. Mikrostruktura, skład chemiczny i fazowy trójwarstwowej powłokowej bariery cieplnej
    - 5.3. Odporność na utlenianie
      - 5.3.1. Próba utleniania cyklicznego
      - 5.3.2. Próba utleniania izotermicznego
    - 5.4. Podsumowanie rozdziału
  6. Analiza wyników badań i podsumowanie
- Literatura
- Streszczenie
- Summary

## Streszczenie

W monografii scharakteryzowano kryteria stanowiące podstawę opracowania nowego procesu wytwarzania powłokowych barier cieplnych (TBC) – fizycznego osadzania z fazy gazowej z odparowaniem za pomocą palnika plazmowego (PS-PVD). Określono warunki natryskiwania plazmowego międzywarstwy metalicznej w procesie LPPS i osadzania zewnętrznej warstwy ceramicznej o budowie kolumnowej w procesie PS-PVD. Wyniki uzyskane w realizowanych procesach doświadczalnych umożliwiły opracowanie technologii powłok TBC na podłożu nadstopów niklu charakteryzujących się różnym składem chemicznym, morfologią mikrostruktury i stanem. Wytwarzano powłoki TBC zarówno dwuwarstwowe – międzywarstwa metaliczna MCrAlY oraz zewnętrzna warstwa ceramiczna YSZ, jak również trójwarstwowe – w których międzywarstwę metaliczną poddano aluminiowaniu w procesie niskoaktywnym CVD w celu wytworzenia dodatkowej warstwy aluminikowej. Opracowane i wytworzone powłoki TBC scharakteryzowano w badaniach mikroskopowych oraz w wyniku analizy ich składu chemicznego i fazowego, a także w próbie utleniania cyklicznego i izotermicznego.

W analizie danych literaturowych przedstawiono procesy wytwarzania powłok TBC. Uwzględniono wytwarzanie międzywarstwy metalicznej w procesach aluminiowania dyfuzyjnego oraz natryskiwania cieplnego. Scharakteryzowano również metody wytwarzania zewnętrznej warstwy ceramicznej powłok TBC, w szczególności w procesie EB-PVD. W dokonanym przeglądzie literatury podkreślono znaczenie hybrydowych procesów natryskiwania cieplnego (LPPS-Thin Film, PS-CVD), zwłaszcza osadzania warstw ceramicznych w procesie PS-PVD.

Analiza danych literaturowych i wyników badań własnych była podstawą sformułowania tezy, że wprowadzenie nowego procesu PS-PVD pozwoli na wytworzenie zewnętrznej warstwy ceramicznej tlenku YSZ o budowie kolumnowej w powłokowych barierach cieplnych. Jednocześnie dodatkowe aluminiowanie międzywarstwy metalicznej MCrAlY zwiększy odporność na utlenianie opracowanej powłoki TBC.

W części badawczej dokonano charakterystyki proszków do natryskiwania warstwy metalicznej – NiCoCrAlY (AMDRY 365-1) oraz warstwy ceramicznej YSZ (Metco 6700). Przedstawiono wyniki prób technologicznych

natryskiwania międzywarstwy metalicznej w procesie LPPS. Ustalono warunki tego procesu wytwarzania dla przyjętych kryteriów: grubości i porowatości. Jednocześnie realizowano w próbach doświadczalnych osadzanie warstwy ceramicznej YSZ w procesie PS-PVD. Badania mikroskopowe stanowiły podstawę do ustalenia warunków procesu determinujących tworzenie się warstwy ceramicznej o budowie kolumnowej. Opracowana technologia była także podstawą do wytworzenia powłok TBC na podłożu nadstopów niklu o różnym składzie chemicznym i fazowym, morfologii mikrostruktury i stanie (przerabiany plastycznie, odlewany konwencjonalnie i w procesie kierunkowej krystalizacji – monokrystaliczny). Wyniki badań mikroskopowych, mikroanalizy składu chemicznego oraz próby utleniania izotermicznego pozwoliły ustalić, że degradację powłoki TBC determinuje budowa międzywarstwy metalicznej, a nie materiał podłoża – nadstop niklu. Dalsze badania mikroskopowe oraz analizę składu chemicznego i fazowego prowadzono zatem dla nadstopu MAR M247. W mikrostrukturze międzywarstwy MCrAlY dwuwarstwowej powłoki TBC stwierdzono obecność kryształów składników fazowych: roztworu stałego  $\gamma$ -Ni i fazy  $\beta$ -NiAl. Ustalono również, że wprowadzone dodatkowe aluminiowanie w niskoaktywnym procesie CVD międzywarstwy metalicznej MCrAlY trójwarstwowej powłoki TBC stwarza warunki termodynamiczne do konstytuowania dodatkowej warstwy złożonej z kryształów faz:  $\beta$ -NiAl i  $\gamma$ -Ni<sub>3</sub>Al. W międzywarstwie metalicznej stwierdzono występowanie porowatości spowodowanej efektem Kirkendalla oraz powstanie strefy SRZ. Jednocześnie w badaniach mikroskopowych trójwarstwowej powłoki TBC po próbie utleniania cyklicznego i izotermicznego wykazano jej większą trwałość w porównaniu z konwencjonalną dwuwarstwową powłoką TBC. Jest to efekt utworzenia się cieńszej warstewki tlenków TGO – przede wszystkim tlenku Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Ustalono również, że w opracowanych warunkach procesu PS-PVD w dwu- i trójwarstwowej powłoce TBC powstaje warstwa ceramiczna YSZ o budowie kolumnowej. Jej skład fazowy stanowią głównie dwie odmiany polimorficzne: M oraz T, tlenku ZrO<sub>2</sub>.