

ANALIZA MIKROSTRUKTURY POWŁOKOWYCH BARIER CIEPLNYCH TBC PO TEŚCIE CYKLICZNEGO UTLENIANIA W TEMPERATURZE 1100°C

Powłokowe bariery cieplne (Thermal Barrier Coatings – TBC) wytwarzane metodą EB-PVD (Electron Beam Physical Vapor Deposition) stosowane są na łopatki wirujące oraz kierujące nowoczesnych silników lotniczych oraz turbin stacjonarnych w celu obniżenia temperatury pracy stopów, z których te elementy są wykonane. Stanowią one system powłok, w których skład wchodzi zewnętrzna powłoka ceramiczna $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ (Yttria Stabilized Zirconia – YSZ) zapewniająca ochronę przed skutkami wysokiej temperatury oraz żaroodporna międzywarstwa chroniąca przed utlenianiem. W artykule przedstawiono wyniki analizy zjawisk zachodzących w powłokowych barierach cieplnych na międzywarstwie aluminidkowej modyfikowanej platyną podczas testu cyklicznego utleniania w temperaturze 1100°C. Przeprowadzono analizę zmian w mikrostrukturze międzywarstwy oraz warstwy tlenkowej Al_2O_3 wzrastającej podczas utleniania wysokotemperaturowego oraz scharakteryzowano obszary, w których następuje degradacja powłokowej bariery cieplnej przez odpadanie zewnętrznej powłoki ceramicznej.

Słowa kluczowe: powłokowe bariery cieplne, nadstopy niklu, utlenianie wysokotemperaturowe

MICROSTRUCTURE ANALYSIS OF THERMAL BARRIER COATINGS AFTER CYCLIC OXIDATION TEST AT 1100°C

Thermal Barrier Coatings (TBC) produced using EB-PVD (Electron Beam Physical Vapor Deposition) method are applied on rotary and stationary blades of modern jet engines and stationary turbines in order to provide temperature reduction of the alloys these components are made of. This coating system includes a ceramic coating $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ (Yttria Stabilized Zirconia – YSZ), providing protection from high temperature, and oxidation resistant bond coating. The article presents the results of phenomena analysis that occur in thermal barrier coatings on platinum modified aluminate bond coating during cyclic oxidation test at 1100°C. Changes that occur in the microstructure of the bond coat and Al_2O_3 oxide layer, that grows during high temperature oxidation, were analyzed as well as areas where the degradation of the thermal barrier coatings occurs by delamination of the top ceramic coating.

Keywords: Thermal Barrier Coatings, nickel superalloys, high temperature oxidation

1. WPROWADZENIE

Powłokowe bariery cieplne (Thermal Barrier Coatings – TBC) izolują elementy turbiny oraz komory spalania nowoczesnych silników lotniczych od gorących gazów i zwiększają ich trwałość oraz wydajność, pozwalając na pracę w wyższej temperaturze. Typowy układ TBC składa się z zewnętrznej powłoki ceramicznej, której połączenie ze stopem podłoża zapewnia żaroodporna międzywarstwa. Zewnętrzna powłoka ceramiczna to zazwyczaj tlenek cyrkonu zawierający 7÷8 mas.% tlenku itru – $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ (yttria stabilized zirconia – YSZ). Dodatek ten zapewnia częściową stabilizację tetragonalnej (i regularnej) fazy tlenku cyrkonu oraz zapobiega zmianom objętości związanym z powstawianiem fazy jednoskośnej [1–3]. Tlenek cyrkonu stabilizowany tlenkiem itru charakteryzuje się niskim współczynnikiem przewodnictwa cieplnego ($\sim 1 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), który jest o rząd wielkości niższy od współczynnika przewodnictwa cieplnego tlenku aluminium. Oznacza to, że w przypadku chłodzonej łopatki turbiny można obniżyć jej temperaturę o 150°C dzięki powłoce o grubości 250÷300 μm [4, 5]. Należy mieć na

uwadze, że tlenek cyrkonu stabilizowany tlenkiem itru nie zapewnia dostatecznej odporności na utlenianie ze względu na dyfuzję w nim tlenu. Rolę taką spełnia dyfuzyjna międzywarstwa, która powinna tworzyć tlenek aluminium, stanowiący granicę rozdziału pomiędzy powłokową barierą cieplną oraz międzywarstwą. W literaturze jest on nazywany Thermally Grown Oxide (TGO) i stanowi go stabilna odmiana tlenku aluminium – $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Właściwości oraz struktura TGO są w dużym stopniu zależne od mikrostruktury oraz składu chemicznego międzywarstwy, a ponadto może na nie mieć wpływ obecność zanieczyszczeń i domieszek [6–8].

Jako międzywarstwę dla powłokowych barier cieplnych otrzymywanych metodą EB-PVD stosuje się powłoki aluminidkowe modyfikowane platyną zapewniające odporność na utlenianie w wysokiej temperaturze [9–11]. Modyfikacja międzywarstw aluminidkowych platyną pozwala na otrzymanie powłok o większej odporności na korozję wysokotemperaturową i cykliczne utlenianie w porównaniu do niemodyfikowanych międzywarstw aluminidkowych. Jednak, ze względu na wysoką cenę platyny ciągle podejmowane są próby za-

stąpienia jej tańszymi pierwiastkami, takimi jak np. pallad, które zapewniłyby porównywalne właściwości międzywarstwom aluminidkowym stosowanym w powłokowych barierach cieplnych [12, 13].

Podczas eksploatacji w wysokiej temperaturze elementów silników lotniczych zachodzi wiele procesów, zależnych od czasu i temperatury prowadzących do degradacji całego systemu powłokowych barier cieplnych. Pośród wielu możliwych przyczyn degradacji powłokowych barier cieplnych wytwarzanych metodą EB-PVD najistotniejszymi są zjawiska zachodzące na granicach: międzywarstwa – tlenek Al_2O_3 , tlenek Al_2O_3 – powłoka ceramiczna $\text{ZrO}_2\cdot\text{Y}_2\text{O}_3$, oraz procesy zachodzące w warstwie tlenkowej Al_2O_3 . Do najczęściej opisywanych mechanizmów degradacji powłokowych barier cieplnych zalicza się przemianę fazy β -NiAl w międzywarstwie w fazę γ' na skutek ubytku Al w wyniku utleniania oraz dyfuzji dordzeniowej [14, 15]. Kolejnym rodzajem przemiany jest odwracalna przemiana martenzytyczna fazy β -NiAl zawierającej od 32 do 34 at.% Al, zachodząca nawet przy wolnym chłodzeniu na powietrzu [16, 17]. Podczas cyklicznie zmieniającej się temperatury na skutek różnicy w rozszerzalności cieplnej pomiędzy międzywarstwą a stopem podłoża dochodzi również do odkształcenia plastycznego powierzchni oraz utraty przyczepności zewnętrznej powłoki ceramicznej [18, 19]. Ponadto, na skutek przemian fazowych oraz naprężeń cieplnych wewnątrz międzywarstwy powstają pustki, które z czasem mogą prowadzić do odkształcenia plastycznego oraz utleniania wewnętrznego międzywarstwy [15, 20].

2. MATERIAŁ, ZAKRES ORAZ METODYKA BADAŃ

Materiał do badań stanowiły próbki z żarowytrzymałego monokrystalicznego nadstopu niklu pokryte powłokowymi barierami cieplnymi składającymi się z zewnętrznej powłoki ceramicznej $\text{ZrO}_2\cdot\text{Y}_2\text{O}_3$ o kolumnowej strukturze oraz międzywarstwy aluminidkowej

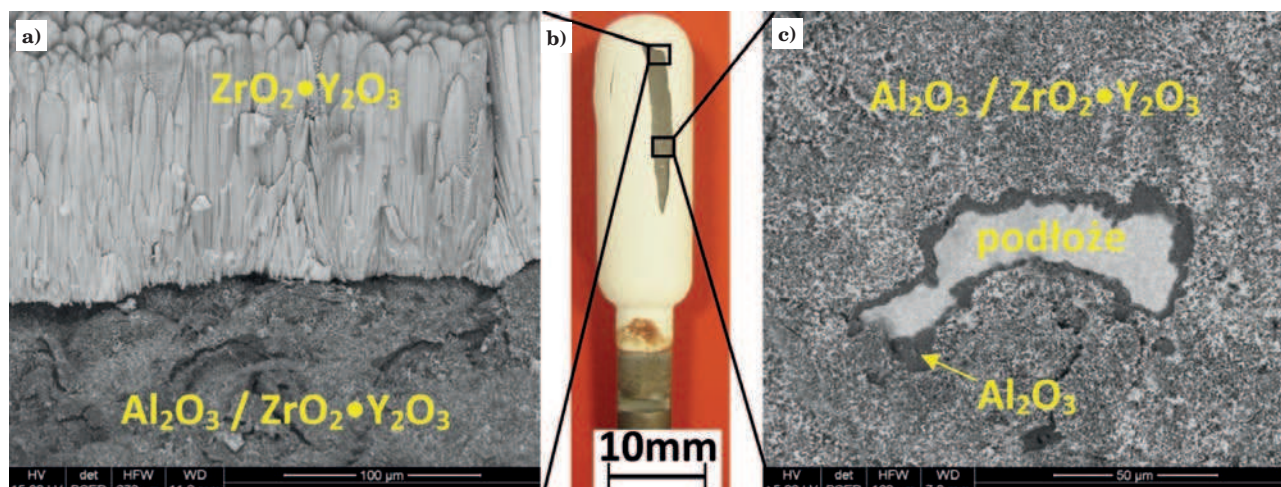
modyfikowanej platyną, które poddano testowi cyklicznego utleniania w temperaturze 1100°C w atmosferze powietrza. Skład chemiczny badanego stopu przedstawiono w tab. 1. Próbkę w kształcie walców o średnicy 10 mm i długości 50 mm poddano platynowaniu galwanicznemu oraz aluminowaniu dyfuzyjnemu w temperaturze 1050°C i czasie 5 h. Zewnętrzną powłokę ceramiczną $\text{ZrO}_2\cdot\text{Y}_2\text{O}_3$ wytworzono metodą fizycznego osadzania z fazy gazowej z odparowaniem wiązką elektronów (EB-PVD – Electron Beam Physical Vapor Deposition). Testy cyklicznego utleniania przeprowadzono w temperaturze 1100°C w jednogodzinnych cyklach na zautomatyzowanym stanowisku na Politechnice Śląskiej. Próbkę umieszczano w piecu o temperaturze 1100°C na czas jednej godziny, po czym były chłodzone przez 15 minut na powietrzu. Testy przerywano w momencie pojawienia się pierwszych oznak odpryskiwania zewnętrznej powłoki ceramicznej.

Tabela 1. Skład chemiczny badanego monokrystalicznego żarowytrzymałego nadstopu niklu drugiej generacji, % masowe

Table 1. Chemical composition of the analyzed single crystal second generation heat resistant nickel superalloy, % weight

Pierwiastek	C	S ppm	Cr	Mo	Fe	Al	Co
Udział %	0,06	0,2	7,03	1,5	0,1	6,14	7,3
Pierwiastek	W	Zr	Ta	Re	Hf	Ni	
Udział %	4,91	0,01	6,5	2,88	0,15	Reszta	

Badania struktury powierzchni próbek przeprowadzono z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego FEI Inspect F. Analizę mikrostruktury oraz substruktury na przekroju poprzecznym warstwy tlenkowej, powstałej podczas testu utleniania, przeprowadzono z wykorzystaniem wysokorozdzielczego elektronowego mikroskopu skaningowo transmisyjnego (S/TEM) FEI TITAN 300-80 wyposażonego w detektory EDS oraz EELS. Próbkę do badań S/TEM przygotowano z wykorzystaniem skupionej wiązki jonów galu – Focused Ion Beam (FIB).



Rys. 1. Makrofotografia próbki (b) po teście cyklicznego utleniania oraz obrazy SEM-BSE obszarów w których nastąpiło odpadanie zewnętrznej powłoki ceramicznej $\text{ZrO}_2\cdot\text{Y}_2\text{O}_3$: a) obraz pochyłony z widocznym falowaniem („rumpling”) powierzchni, c) obraz odkrytego podłoża

Fig. 1. Macrograph of the sample (b) after cyclic oxidation test and SEM-BSE images of the areas where delamination of the ceramic $\text{ZrO}_2\cdot\text{Y}_2\text{O}_3$ top coating occurred: a) tilted image with visible rumpling of the surface, c) image of the revealed substrate

Przeprowadzono analizę mikrostruktury powierzchni próbki pokrytej powłokową barierą cieplną po 385 jednogodzinnych cyklach w temperaturze 1100°C w obszarze odpryskiwania zewnętrznej powłoki ceramicznej $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$. Makrofotografię próbki po teście utleniania przedstawiono na rys. 1b razem z oznaczonymi obszarami, które poddano analizie strukturalnej (Rys. 1a i c).

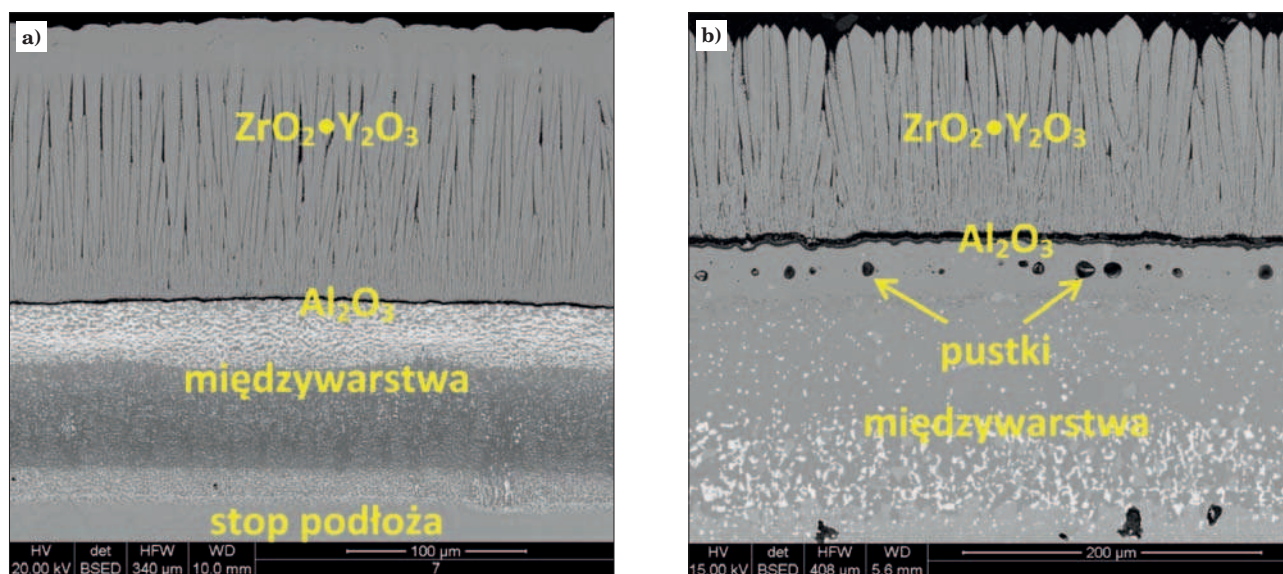
3. WYNIKI I DYSKUSJA

Na rys. 1a przedstawiono mikrostrukturę powierzchni na granicy obszaru, w którym nastąpiło odpryskiwanie zewnętrznej powłoki ceramicznej $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ oraz obszaru, gdzie pozostała ona przyczepna. Zewnętrzna powłoka ceramiczna $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ charakteryzuje się budową kolumnową, która jest charakterystyczna dla powłok uzyskiwanych z wykorzystaniem metody fizycznego osadzania z fazy gazowej z odparowaniem wiązką elektronów (EB-PVD). Nie stwierdzono pęknięć wewnątrz powłoki, co świadczy o tym, że dekohezja spowodowana była wyłącznie zjawiskami następującymi na granicy rozdziału z podłożem, które stanowi międzywarstwa aluminidkowa oraz cienka warstwa tlenkowa Al_2O_3 wzrastająca podczas utleniania wysokotemperaturowego. Na odkrytej powierzchni stwierdzono występowanie mieszaniny warstwy Al_2O_3 oraz zakotwiczonej w niej bardzo cienkich igieł $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ będących pozostałością po zewnętrznej powłoce ceramicznej. Odkryty obszar charakteryzuje się rozwiniętą powierzchnią oraz licznymi pęknięciami w warstwie tlenkowej. Zjawisko odkształcenia plastycznego powierzchni podczas cyklicznie zmieniającej się temperatury nazywane jest w literaturze „falowaniem” powierzchni („rumpling” – j. ang.) oraz stanowi jedną z podstawowych przyczyn degradacji powłokowych barier ciepłych. Badania przeprowadzone przez Tolpygo et al. [18, 19] wskazują, że rumpling następuje w wyniku różnicy w rozszerzalności cieplnej pomiędzy stopem podłoża a międzywarstwą, co prowadzi do jej

odkształcenia plastycznego i dekohezji na granicy rozdziału z powłoką ceramiczną. Na rys. 1c przedstawiono fraktografię powierzchni odkrytej po odpadnięciu powłoki ceramicznej. Stwierdzono w niej występowanie obszarów mieszaniny $Al_2O_3/ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ oraz powierzchni międzywarstwy aluminidkowej, gdzie nastąpiło odpadanie warstwy tlenkowej Al_2O_3 .

Przeprowadzono analizę mikrostruktury przekroju poprzecznego powłokowej bariery ciepłej na międzywarstwie aluminidkowej modyfikowanej platyną przed (Rys. 2a) i po teście cyklicznego utleniania (Rys. 2b).

W stanie wyjściowym, przed testem cyklicznego utleniania, mikrostruktura na przekroju poprzecznym międzywarstwy aluminidkowej modyfikowanej platyną charakteryzowała się występowaniem zewnętrznej strefy o budowie dwufazowej (β -NiAl oraz PtAl₂) i grubością około 110 μ m. Na granicy rozdziału pomiędzy zewnętrzną powłoką ceramiczną $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ a międzywarstwą występowała cienka warstwa tlenku Al_2O_3 , która wzrasta podczas utleniania wysokotemperaturowego. Podczas 385 jednogodzinnych cykli w temperaturze 1100°C wewnątrz międzywarstwy następują procesy dyfuzji dordzeniowej oraz odrdzeniowej, na skutek czego dochodzi w niej do przemian fazowych oraz wzrostu jej grubości. Mikrostruktura na przekroju poprzecznym międzywarstwy po teście cyklicznego utleniania (Rys. 2b) charakteryzuje się rozwiniętą granicą rozdziału pomiędzy międzywarstwą a zewnętrzną powłoką ceramiczną oraz występowaniem pustek o wielkości około 10 μ m w strefie zewnętrznej międzywarstwy. Występowanie pustek o tak dużych rozmiarach może prowadzić do odkształcenia powierzchni, utleniania wewnętrznego oraz ostatecznie do oddzielenia wewnętrznej strefy międzywarstwy od podłoża. Ich pochodzenie może być efektem Kirkendalla i rozpuszczania fazy PtAl₂ podczas utleniania wysokotemperaturowego oraz, jak wskazują dane literaturowe [20], naprężeń cieplnych spowodowanych różnicą w rozszerzalności cieplnej pomiędzy stopem podłoża i międzywarstwą. Ponadto, na skutek wzrostu warstwy tlenkowej Al_2O_3 i ubytku Al z międzywarstwy następuje przemiana



Rys. 2. Mikrostruktura na przekroju poprzecznym powłokowej bariery ciepłej na międzywarstwie aluminidkowej modyfikowanej platyną: a) w stanie wyjściowym, b) po 385 cyklach jednogodzinnych w temperaturze 1100°C

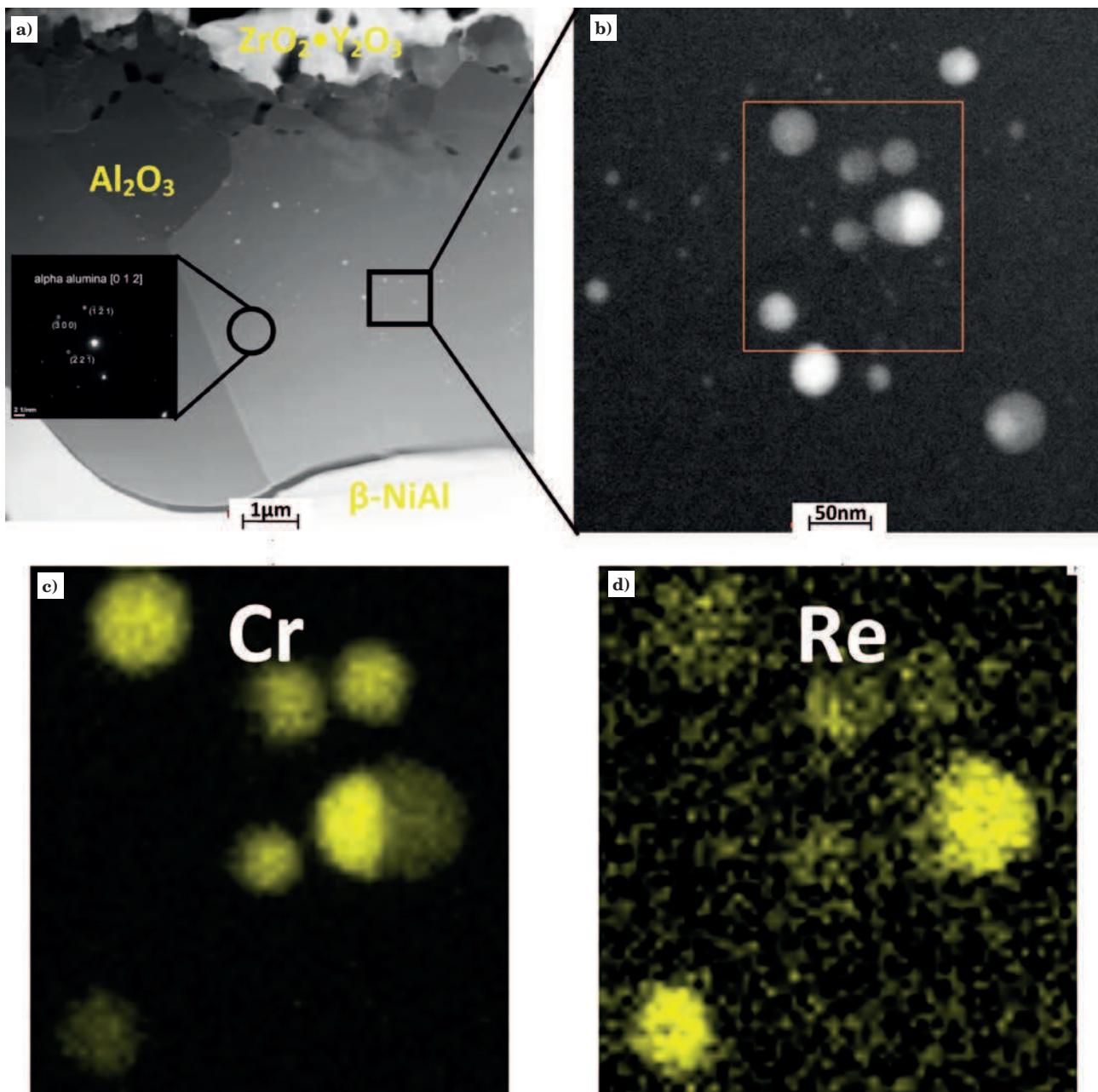
Fig. 2. Microstructure on the cross-section of the thermal barrier coating on a platinum modified aluminide bond coating: a) initial state, b) after 385 one hour cycles at 1100°C

fazy β -NiAl w fazę γ '-Ni₃Al, która charakteryzuje się niższą żaroodpornością i może prowadzić do utleniania pierwiastków wchodzących w skład stopu podłoża, takich jak Ta, oraz do przyspieszonej degradacji całego systemu powłokowego.

Wyniki analizy mikrostruktury warstwy tlenkowej Al₂O₃ z wykorzystaniem skaningowo transmisyjnej mikroskopii elektronowej STEM przedstawiono na rys. 3 i 4. Obraz STEM HAADF (High Angular Annular Dark Field) mikrostruktury warstwy tlenkowej Al₂O₃ razem z dyfrakcją elektronową dla fazy α -Al₂O₃ przedstawiono na Rys. 3a. Analizę rozmieszczenia pierwiastków wewnątrz warstwy Al₂O₃ w nanoobszarach przedstawiono na rys. 3b-d.

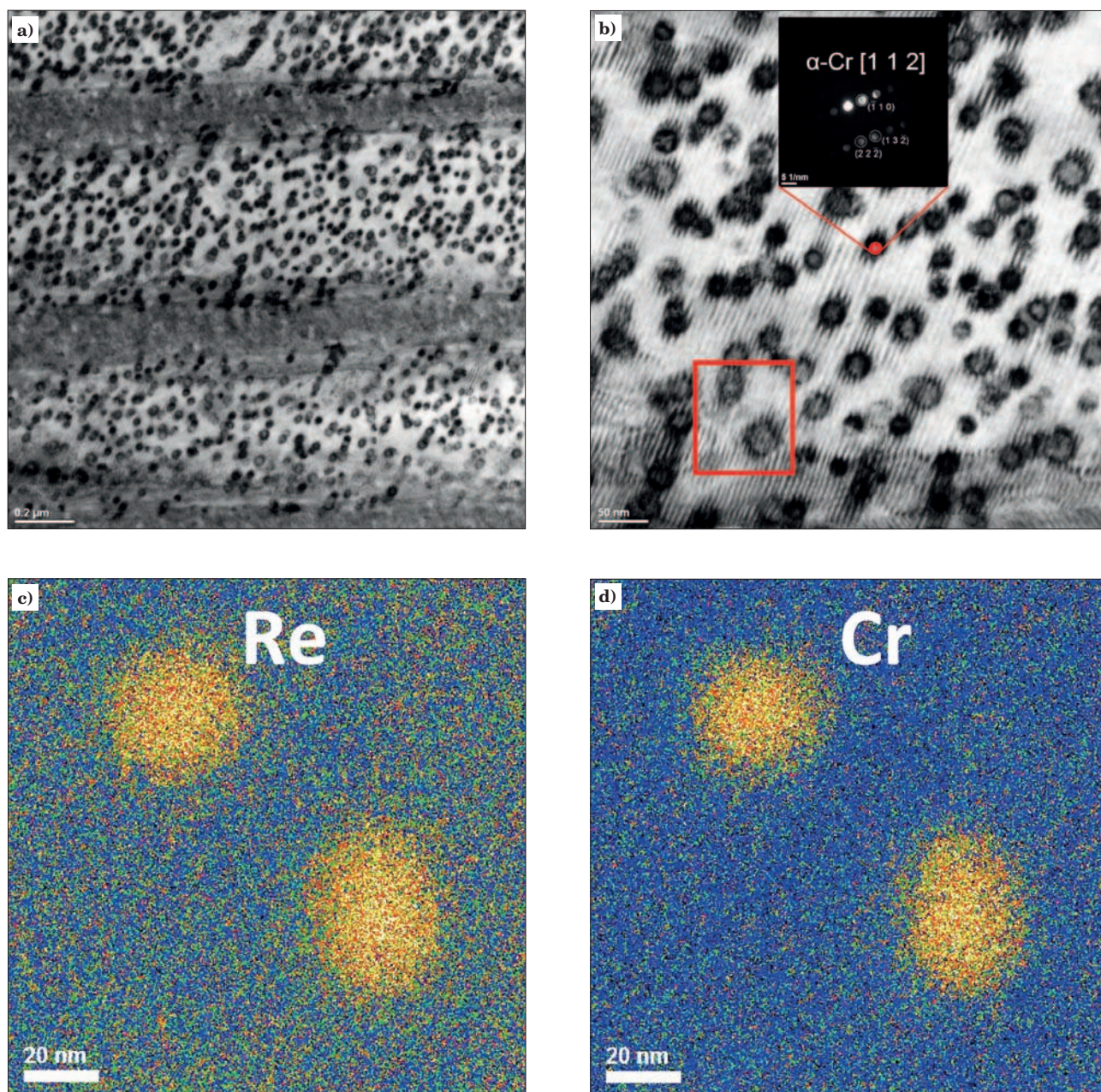
Podczas utleniania wysokotemperaturowego powłokowych barier cieplnych pomiędzy zewnętrzną powłoką

ceramiczną ZrO₂·Y₂O₃ a międzywarstwą aluminidkową następuje wzrost cienkiej warstwy tlenkowej Al₂O₃, której przyczepność oraz trwałość determinowana jest strukturą oraz składem chemicznym międzywarstwy. Warstwa Al₂O₃, której mikrostrukturę przedstawiono na obrazie HAADF na rys. 3a, w analizowanej powłokowej barierze cieplnej ma grubość około 10 μ m i charakteryzuje się występowaniem równoosiowych ziarn α -Al₂O₃. W obszarze granicznym z zewnętrzną powłoką ceramiczną ziarna Al₂O₃ powstawały w początkowych etapach utleniania jako odmiana θ , która z czasem uległa przemianie w odmianę α -Al₂O₃, o czym świadczą porowatości na granicach ziarn powstałe na skutek zmiany objętości podczas przemiany [21, 22]. W strefie wewnętrznej warstwy Al₂O₃ występują bardzo duże ziarna α -Al₂O₃ o średnicy około 10 μ m, które zarodkują



Rys. 3. Obraz HAADF-STEM mikrostruktury warstwy tlenkowej Al₂O₃ powstałej podczas testu cyklicznego utleniania w temperaturze 1100°C (a), b) miejsce występowania wydzielen w warstwie Al₂O₃ z oznaczonym obszarem analizy rozmieszczenia pierwiastków: c) Cr, d) Re

Fig. 3. HAADF-STEM image of the Al₂O₃ oxide layer microstructure formed during cyclic oxidation test at 1100°C (a), b) region with precipitates in the Al₂O₃ layer with marked elemental distribution analysis area: c) Cr, d) Re



Rys. 4. Obraz jasnego pola mikrostruktury międzywarstwy po odwracalnej przemianie martenzytycznej fazy β -NiAl (a,b), analiza rozmieszczenia pierwiastków EFTEM c) Re, d) Cr

Fig. 4. Bright field image of the bond coating microstructure after a reversible martensitic transformation of the β -NiAl phase (a,b), EFTEM elemental distribution analysis c) Re, d) Cr

na granicy rozdziału pomiędzy strefą zewnętrzną i międzywarstwą oraz wzrastają przez dordzeniową dyfuzję tlenu po granicach ziarn Al_2O_3 . W wyniku przeprowadzonych badań w warstwie tlenkowej wzrastającej dordzeniowo stwierdzono obecność drobnych wydzieleni występujących początkowo w międzywarstwie, co przedstawiono na rys. 3b oraz na rozmieszczeniu pierwiastków na rys. 3c i d. Wydzielenia te charakteryzują się średnicą od kilku do około 40 nm oraz zawierają Cr i Re (Rys. 3c,d).

Odrzenniowa dyfuzja Al następująca podczas wzrostu warstwy Al_2O_3 oraz dyfuzja dordzeniowa powodują zubożenie międzywarstwy w ten pierwiastek. Faza β -NiAl zubożona w Al ($\sim 32\div 34$ at.%) może ulegać odwracalnej przemianie martenzytycznej podczas chłodzenia pomiędzy poszczególnymi cyklami utleniania.

Bezdyfuzyjna przemiana martenzytyczna jest zwykle związana z wysokimi szybkościami chłodzenia, jednak w układzie Ni-Al do jej zajścia wystarczy chłodzenie na powietrzu, co zostało zaobserwowane w wielu eksperymentach [16, 17]. Badania przeprowadzone przez Zhang et al. [17] wykazały, że przemiana martenzytyczna fazy NiAl związana jest ze zmianą objętości o $-2,25\%$ dla międzywarstw aluminiokowych modyfikowanych platyną, jednak wartość ta może się znacznie różnić w przypadku pokrytych stopów o odmiennym składzie chemicznym. Jak wskazują dane literaturowe [17] przemiana ta odgrywa ważną rolę w powstawaniu naprężeń wewnątrz powłoki oraz może prowadzić do odkształcenia plastycznego na jej powierzchni podczas powtarzających się cykli nagrzewania i chłodzenia. W badanej międzywarstwie stwierdzono występowanie

obszarów, w których zaszła przemiana martenzytyczna, o czym świadczy listwowa mikrostruktura przedstawiona na rys. 4a.

Wewnątrz listew martenzytu stwierdzono również występowanie nanobliźniaków oraz bardzo drobnych wydzielen, o średnicy 20÷30 nm (Rys. 4b). Wykorzystując mikrodyfrakcję elektronową zidentyfikowano je jako fazę α -Cr. Wydzielenia te zawierają również Re co wykazała analiza rozmieszczenia pierwiastków przeprowadzona z wykorzystaniem metody EELS-EFTEM (Rys. 4c,d). Ich obecność jest najprawdopodobniej powodowana wydzieleniem na skutek zmiany rozpuszczalności Cr w fazie β -NiAl. Badania przeprowadzone przez Pint et al. [23] wskazują, że wydzielenia α -Cr mogą mieć negatywny wpływ na przyczepność warstwy tlenkowej, jeżeli znajdują się na granicy rozdziału międzywarstwy- Al_2O_3 .

4. PODSUMOWANIE

W artykule przeprowadzono analizę mechanizmów degradacji powłokowych barier ciepłych na między-

warstwie aluminikowej modyfikowanej platyną po testach cyklicznego utleniania. Degradację w postaci odpadania zewnętrznej powłoki ceramicznej $\text{ZrO}_2\cdot\text{Y}_2\text{O}_3$ stwierdzono po 385 jednogodzinnych cyklach w temperaturze 1100°C. Odwarstwienie nastąpiło głównie na granicy rozdziału pomiędzy warstwą tlenkową Al_2O_3 (TGO) oraz powłoką $\text{ZrO}_2\cdot\text{Y}_2\text{O}_3$ w wyniku falowania („rumpling”) powierzchni międzywarstwy najprawdopodobniej na skutek różnicy w rozszerzalności cieplnej z podłożem, podczas kolejnych cykli nagrzewania i chłodzenia. W mniejszym stopniu odwarstwienie następowało na granicy rozdziału międzywarstwy – warstwy tlenkowej Al_2O_3 . Na skutek procesów dyfuzji oraz naprężeń cieplnych w zewnętrznej strefie międzywarstwy powstały pustki, które mogą prowadzić do utleniania wewnętrznego oraz całkowitego oddzielenia strefy zewnętrznej międzywarstwy od podłoża w ciągu dalszego utleniania. Faza β -NiAl na skutek ubytku Al oraz chłodzenia po każdym cyklu utleniania ulega przemianie martenzytycznej, której towarzyszy wydzielenie fazy α -Cr zawierającej Re, która może mieć negatywny wpływ na przyczepność warstwy tlenkowej Al_2O_3 .

LITERATURA

- Bose S.: High Temperature Coatings, Elsevier, 2007
- Tamarin Y.: Protective Coatings for Turbine Blades, ASM International, 2002
- Reed R.C., in: The Superalloys: Fundamentals and Application, Cambridge University Press, 2008, p. 322
- Nicholls J.R.: Designing oxidation-resistant coatings, 52 (2000), 28-35
- Birks N., Meier G.H., F. S. Pettit F.S.: Introduction to the High-Temperature Oxidation of Metals, 2nd Edn., Cambridge University Press, Cambridge, 2006, p. 290
- Evans G., Clarke D., Levi C.: The influence of oxides on the performance of advanced gas turbines, J. Eur. Ceram. Soc., 28 (2008), 1405.
- Haynes J.A.: Potential influences of bond coat impurities and void growth on premature failure of EB-PVD TBCs, Scr. Mater., 2001, 44, 1147-1152
- Hou P.Y.: Segregation Phenomena at Thermally Grown Al_2O_3 /Alloy Interfaces, Annu. Rev. Mater. Res. 2008, 38, 275
- Haynes J.A., More K.L., Pint B.A., Wright I.G., Cooley K., Zhang Y.: Effects of Platinum Additions on the Adherence of Alumina Scales to CVD Aluminate Bond Coatings, Materials Science Forum, 369-372, 679
- Haynes J.A., Pint B.A., More K.L., Zhang Y., Wright I.G.: Influence of Sulfur, Platinum, and Hafnium on the Oxidation Behavior of CVD NiAl Bond Coatings, Oxid. Met., 58, 2002, 513-544
- Swadźba R., Wiedermann J., Hetmańczyk M., Swadźba L., Witala B., Moskal G., Mendala B., Komendera Ł.: Microstructural examination of TGO formed during preoxidation on Pt-aluminized N5 superalloy, Mater. Corr., 2013, w druku
- Swadźba R., Hetmańczyk M., Sozańska M., Witala B., Swadźba L.: Structure and cyclic oxidation resistance of Pt, Pt/Pd-modified and simple aluminate coatings on CMSX-4 superalloy, Surf. Coat. Technol., 206 (2011) 1538-1544.
- Swadźba R., Hetmańczyk M., Wiedermann J., Swadźba L., Moskal G., Witala B., Radwański K.: Microstructure degradation of simple, Pt- and Pt + Pd-modified aluminate coatings on CMSX-4 superalloy under cyclic oxidation conditions, Surf. Coat. Technol. 215 (2013) 16-23.
- Haynes J.A.: Potential Influences of bond coat impurities and void growth on premature failure of EB-PVD TBCs, Scripta mater. 44 (2001) 1147-1152
- Angenete J., Stiller K., Bakchinova E.: Microstructural and microchemical development of simple and Pt-modified aluminate diffusion coatings during long term oxidation at 1050°C, Surf. Coat. Technol. 176 (2004) 272.
- Chen M.W., Ott R. T., Hufnagel T.C., Wright P.K., Hemker K.J.: Characterization and modeling of a martensitic transformation in a platinum modified diffusion aluminate bond coat for thermal barrier coatings, Surf. Coat. Technol., 163-164 (2003) 25
- Zhang Y., Haynes J.A., Pint B.A., Wright I.G., Lee W.Y.: Martensitic transformation in CVD NiAl and (Ni,Pt)Al bond coatings, Surf. Coat. Technol. 163-164 (2003) 19
- Tolpygo V.K., Clarke D.R.: Temperature and cycle-time dependence of rumpling in platinum-modified diffusion aluminate coatings, Scripta Materialia 57 (2007) 563-566
- Tolpygo V.K., D.R. Clarke D.R.: On the rumpling mechanism in nickel-aluminate coatings Part I: an experimental assessment, Acta Materialia 52 (2004) 5115-5127
- Tolpygo V.K.: Development of internal cavities in platinum-aluminate coatings during cyclic oxidation, Surface & Coatings Technology 202 (2007) 617-622
- Swadźba R., Wiedermann J.: Zastosowanie metody STEM oraz FIB w badaniach struktury warstwy wierzchniej żarowytrzymałego monokrystalicznego nadstopu niklu po utlenianiu wysokotemperaturowym, Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, 2 (2013), 15-19
- Pint B.A., Oxid. Met., On the formation of interfacial and internal voids in α - Al_2O_3 scales, 1997, 48, 303-326
- Pint B.A., More K.L., Wright I.G., Tortorelli P.F.: Characterization of Thermally Cycled Alumina Scales, Materials at High Temperature, 17 (2000), 165-71