

Badania mikrostruktury oraz wybranych właściwości powłok stabilizowanego tlenku cyrkonu wytworzanych metodą natryskiwania plazmowego z zawiesin

The characterization of microstructure
and selected properties of zirconia coatings
obtained by suspension plasma spraying method

Streszczenie

Powłoki ceramiczne na bazie tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru (Y_2O_3) są stosowane głównie jako bariery cieplne na powierzchniach elementów narażonych na działanie bardzo wysokich temperatur, m.in. łopatek turbin gazowych. Przeprowadzone badania prezentują możliwości wytworzenia omawianych powłok z użyciem nowej metody – natryskiwania plazmowego z zawiesin. W celu wytworzenia powłok użyto proszku o handlowej nazwie Tosoh TZ-8YS o składzie chemicznym $ZrO_2 + 8\% \text{ mol. } Y_2O_3$ oraz submikrometrycznej wielkości cząsteczek. Proces natryskiwania został przeprowadzony z użyciem dwóch stanowisk do natryskiwania, wyposażonych w różne palniki plazmowe (SG-100 firmy Praixair oraz Triplex firmy SulzerMetco). W celu określenia mikrostruktury powłok zostały wykonane badania na mikroskopie świetlnym, skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) oraz dyfraktometria rentgenowska (XRD). Ponadto wykonano badania wybranych właściwości mechanicznych, m.in. przyczepności oraz kohezji powłok metodą testu zarysowania.

Słowa kluczowe: natryskiwanie plazmowe z zawiesin, stabilizowany tlenek cyrkonu, badania mikrostruktury, test zarysowania

Abstract

Ceramic coatings based on yttria stabilized zirconia, YSZ, are mainly used as thermal barrier coatings on the surfaces of components exposed to very high temperatures, e.g. gas turbine blades. The presented researches are focused on suspension plasma spraying, SPS, which can be used to produce above mentioned coatings. The commercial powder Tosoh TZ-8YS with a chemical composition of $ZrO_2 + 8\% \text{ mol. } Y_2O_3$ and submicrometric particles size was used to prepare the coatings. The spraying process was carried out with the use of two different spraying platforms, equipped with two different plasma torches (SG-100 of Praixair and Triplex of SulzerMetco). To characterize the microstructure of coatings the optical microscopy, SEM microscopy and XRD diffractometry were used. Moreover, some mechanical properties, like adhesion and cohesion of coatings by scratch test method were also measured.

Keywords: Suspension Plasma Spraying, stabilized zirconia, microstructure characterization, scratch test

Mgr inż. Paweł Sokołowski, dr inż. Leszek Łatka, prof. dr hab. inż. Andrzej Ambroziak – Politechnika Wroclawska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: pawel.sokolowski@pwr.wroc.pl

Wstęp

Metoda natryskiwania plazmowego z zawiesin, SPS (ang. *suspension plasma spraying*) umożliwia wytworzenie powłok, które ze względu na bardzo drobną strukturę, submikrometryczną, a nawet nanometryczną, wykazują wyjątkowe właściwości, np. mechaniczne [1, 2]. Jest to stosunkowo nowa technika nanoszenia powłok, opracowana na Uniwersytecie Sherbrook w Kanadzie w 1997 r. [3]. Jej innowacją jest transport bardzo drobnych cząstek proszku w osłonie fazy ciekłej, a nie gazowej, jak w przypadku atmosferycznego natryskiwania plazmowego, APS (ang. *atmospheric plasma spraying*). Poza tym proces SPS jest konkurencyjny w stosunku do tradycyjnych metod otrzymywania nanostrukturalnych powłok, osadzania z fazy gazowej, PVD, CVD i ich pochodnych, których podstawowymi wadami są bardzo długi czas osadzania oraz niewielka grubość wytwarzanych powłok [2, 4, 5]. Należy jednak podkreślić, że procesy występujące podczas natryskiwania plazmowego z zawiesin są o wiele bardziej skomplikowane niż w klasycznej odmianie APS [6, 7].

Wstrzeliwanie zawiesiny zależy od konstrukcji palnika plazmowego, jednak w większości przypadków jest ono realizowane prostopadle do jego osi. Ponadto możliwe jest zastosowanie układu rozpylającego lub dyszy formującej ciągły strumień kropli [8]. Wstrzeliwanie musi zapewnić kroplom zawiesiny dotarcie do strefy wysokiej temperatury strumienia plazmy, aby dostarczyć odpowiednią ilość ciepła, niezbędną do przetopienia materiału [9]. Zastosowanie drugiego sposobu skutkuje powstaniem unikalnej, tzw. dwustrefowej mikrostruktury [10, 11].

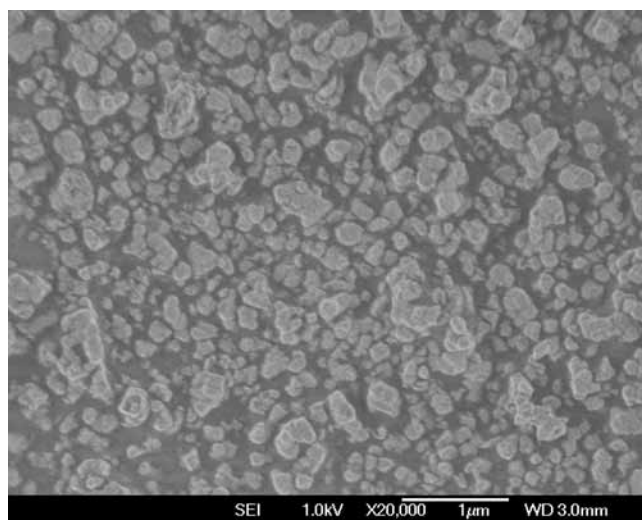
Natryskane plazmowo z zawiesin powłoki stabilizowanego ZrO_2 mogą być zastosowane głównie jako bariery cieplne, lecz również jako stałe elektrolity w ogniwach paliwowych [12, 13]. Wynika to z lepszego uformowania lameli, ograniczonego powstawania mikropęknięć oraz łatwości kontroli porowatości powłok [14]. Tlenek cyrkonu stabilizowany tlenkiem itru, YSZ (ang. *yttria stabilized zirconia*) jest często stosowanym materiałem na bariery cieplne, TBC (ang. *thermal barrier coatings*) ze względu na bardzo dobre właściwości [15]. Podstawowym problemem takich powłok jest ich trwałość w bardzo wymagających warunkach pracy. Aby sprostać wciąż rosnącym wymaganiom, np. wyższa temperatura pracy turbiny, która bezpośrednio przekłada się na zwiększenie jej wydajności, prace badawcze związane są z dwoma obszarami. Jednym jest poszukiwanie nowych materiałów, np. stabilizacja tlenku cyrkonu pierwiastkami ziem rzadkich [16, 17]. Drugim natomiast jest rozwój technologii otrzymywania powłok, które będą się charakteryzować lepszymi właściwościami [18, 19]. Zauważono, że powłoki wytworzone metodą SPS charakteryzują się niższą przewodnością cieplną w szerszym zakresie temperatur niż otrzymane techniką EB-PVD lub APS, jak również wykazują lepszą odporność na szoki termiczne [20, 21].

W pracy przedstawiono wyniki badań mikrostruktury oraz wybranych właściwości mechanicznych powłok tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru natryskiwanych plazmowo z zawiesin.

Opis eksperymentu

Przygotowanie proszku oraz zawiesiny

Wyjściowym materiałem był handlowy proszek Tosoh TZ-8YS o składzie chemicznym $ZrO_2 + 8\% \text{ mol. } Y_2O_3$ o średnim rozmiarze cząsteczek $d_{v50} = 344 \text{ nm}$. Badania rozkładu wielkości cząsteczek proszku zostały przeprowadzone metodą dynamicznego rozpraszania światła, DLS (ang. *dynamic light scattering*), na urządzeniu Zetasizer Nano-ZS (Malvern Instruments). Strukturę proszku przedstawiono na rysunku 1 (skaningowy mikroskop elektronowy, SEM, Jeol JSM-7400). Jak można zauważyć, cząsteczki proszku mają wielkość poniżej 500 nm. Proszek miał strukturę kubiczną ze względu na wysoką zawartość itru. Zawiesina użyta w procesie natryskiwania zawierała 5% wag. proszku, 47,5% wag. wody destylowanej oraz 47,5% wag. etanolu. Ostatnim składnikiem był dyspergator (Beycostat C213, CECA), który wpływał na polepszenie stabilności zawiesiny. Zostało to potwierdzone wynikiem pomiaru potencjału zeta (ζ) wynoszącym $-82,5 \text{ mV}$. Wartość ta spełnia kryteria stabilności zawiesin (poniżej -30 mV lub powyżej $+30 \text{ mV}$) [22].



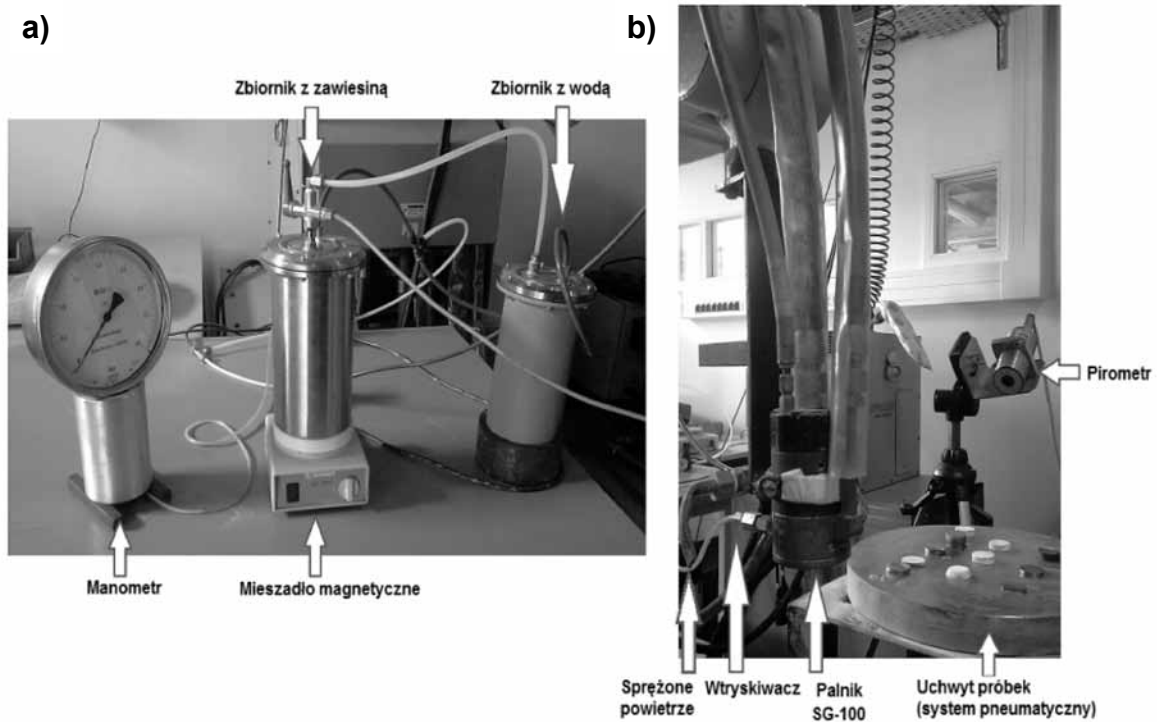
Rys. 1. Proszek Tosoh, SEM (elektrony wtórne), pow. 20 000x
Fig. 1. The morphology of Tosoh powder, SEM (secondary electrons), mag. 20 000x

Dobór parametrów natryskiwania

Proces nanoszenia powłok wykonany został z użyciem dwóch różnych systemów do natryskiwania, wyposażonych w różne palniki plazmowe. Pierwsze stanowisko zbudowane zostało z użyciem o jednokatodowego palnika SG-100 (Praxair S.T., Indianapolis, In, USA), który został zamontowany na ramieniu 5-osiowego, przemysłowego robota IRB-6 (ABB, Zürich, Szwajcaria). W czasie natryskiwania palnik przesuwiał się nad stołem, na którym umieszczone były podłoża stalowe. Natomiast do stołu została podłączona pompa próżniowa, która miała za zadanie unieruchomić podłoża w czasie procesu. Stanowisko było ponadto wyposażone w system chłodzenia próbek sprężonym powietrzem w czasie natryskiwania – został zamocowany przy palniku, a także system monitorowania temperatury przy użyciu pirometru (rys. 2). Wtryskiwacz zawiesiny umiejscowiony był wewnątrz palnika (tzw. wewnętrzny układ wstrzeliwania zawiesiny).

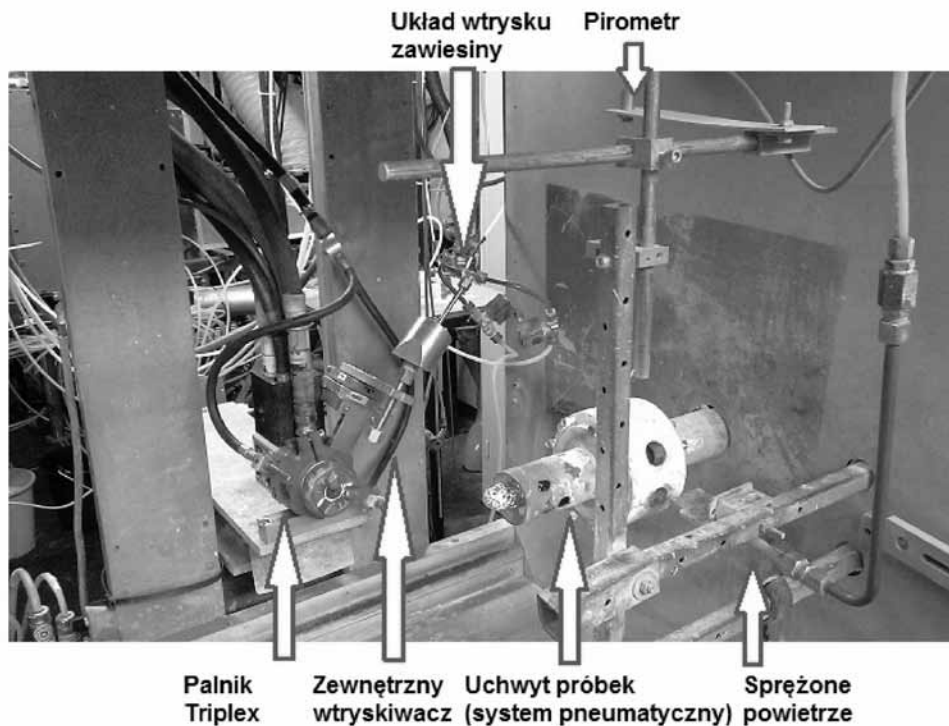
Drugie stanowisko wyposażone było w trzykatodowy palnik Triplex (Sulzer Metco, Szwajcaria). Palnik ten w czasie natryskiwania był nieruchomy, natomiast podłoża stalowe umieszczone były w uchwycie, który wykonywał złożony ruch obrotowy i posuwisto-zwrotny (rys. 3). Zamocowanie próbek, podobnie jak w poprzednim stanowisku, realizowane było z wykorzystaniem pompy próżniowej. Stanowisko do natryskiwania było wyposażone również w układ chłodzenia sprężonym powietrzem oraz w system bezkontaktowego pomiaru temperatury. Ponadto, w odróżnieniu do palnika SG-100, wtryskiwacz zawieszony umiejscowiony był tu poza palnikiem plazmowym (tzw. zewnętrzny układ wstrzeliwania).

niem pompy próżniowej. Stanowisko do natryskiwania było wyposażone również w układ chłodzenia sprężonym powietrzem oraz w system bezkontaktowego pomiaru temperatury. Ponadto, w odróżnieniu do palnika SG-100, wtryskiwacz zawieszony umiejscowiony był tu poza palnikiem plazmowym (tzw. zewnętrzny układ wstrzeliwania).



Rys. 2. Stanowisko do natryskiwania wyposażone w palnik plazmowy SG-100: a) układ pneumatycznego podawania zawiesiny, b) widok palnika i zamocowanych próbek

Fig. 2. Spraying platform with the SG-100 plasma torch: a) pneumatic system of suspension injection mode, b) the view of plasma torch and samples



Rys. 3. Stanowisko do natryskiwania wyposażone w palnik plazmowy Triplex

Fig. 3. Spraying platform with the Triplex plasma torch

Ze względu na duże różnice w budowie stanowisk i samych palników parametry natryskiwania zostały dobrane niezależnie dla dwóch stanowisk. Parametry zostały przedstawione w tablicy I, natomiast najważniejsze różnice dotyczyły: składu i wydatku gazów plazmowych, odległości natryskiwania, średnicy wtryskiwacza oraz zastosowanego ciśnienia wstrzeliwania zawiesiny.

Proces realizowany był do momentu osiągnięcia grubości powłok na poziomie 50 µm. Z kolei przygotowanie podłoża stalowych (stal chromowo-niklowa o strukturze austenitycznej, X₂CrNi 19-11, wg PN-EN 10088-1:2007) przed procesem natryskiwania obejmowało szlifowanie z użyciem papieru ściernego o granulacji 320. Ponadto bezpośrednio przed nanoszeniem powłok podłoża były czyszczone w wannie ultradźwiękowej z użyciem etanolu.

Badania mikrostruktury powłok

Istotnym elementem badań było scharakteryzowanie najistotniejszych właściwości mikrostruktury powłok, tj.: grubości, porowatości, morfologii powłok oraz ich składu fazowego. Grubość powłok została zmierzona na przekrojach poprzecznych zarejestrowanych z użyciem mikroskopu świetlnego (Olympus CK 40M). Pomiary prowadzone były w trzech obszarach próbek, w każdym wykonano 5 pomiarów. Na podstawie wykonanych pomiarów zostało również określone odchylenie standardowe grubości powłok.

Z kolei porowatość powłok została ustalona na podstawie analizy zdjęć z mikroskopu skaningowego (Philips XL 30). Pomiary prowadzone były w 5 różnych miejscach powłok przy stałym powiększeniu. Podobnie jak w przypadku grubości powłok, na podstawie pomiarów obliczono również odchylenie standardowe porowatości powłok.

Budowa powłok została scharakteryzowana również przy użyciu mikroskopii SEM, zdjęcia zostały wykonane na przekroju poprzecznym powłok z użyciem detektora elektronów wstecznie rozproszonych. Ponadto w celu określenia składu fazowego powłok zostały wykonane pomiary z użyciem dyfraktometrii rentgenowskiej XRD (Bruker D8 Advance). Wspomniany dyfraktometr pracuje zgodnie z geometrią Bragga-Brentany (θ - 2θ). Widmo promieniowania rentgenowskiego (promienianie CuK α 1) zarejestrowane zostało w zakresie kątów 2θ od 15 do 120°. Analiza jakościowa została przeprowadzona z użyciem specjalnego programu Diffrac+Eva software z wykorzystaniem międzynarodowej bazy danych wzorców dyfrakcyjnych JCPDS-ICDD.

Badania właściwości mechanicznych

Ostatni etap badań dotyczył scharakteryzowania przyczepności powłok do podłoża (adhezji) oraz sił spójności materiału powłoki (kohezji). W obu przypadkach wykorzystano test zarysowania (ang. *scratch test*), z tym że pomiary wykonywane były przy różnych parametrach w celu określenia wspomnianych właściwości powłok. W każdym przypadku wykonane zostały trzy pomiary.

Pomiary przyczepności powłok realizowane były przy narastającym obciążeniu od 0,9 do 200 N. Zakres sił odpowiadał minimalnej oraz maksymalnej sile możliwej dla wykorzystywanego urządzenia pomiarowego (Revetest, RST, CSM Instruments). Wspomniane urządzenie wyposażone było we wgłębnik Vickersa o promieniu zaokrąglenia 200 µm. Rysy wykonywane były na długości 10 mm z prędkością przesuwu wgłębnika 5 mm/min. Z kolei siłę krytyczną, która odpowiadała adhezji naniesionych powłok, odczytywano w miejscu, gdzie następowały pierwsze widoczne uszkodzenia powłoki.

Tablica I. Zestawienie parametrów natryskiwania
Table I. Spray parameters used to produce coatings

Palnik	SG-100, Praixair	Triplex, Sulzer
Parametr, jednostka	wartość	wartość
Moc elektryczna, kW	40	45
Skład gazów plazmowych	Ar + H ₂	Ar
Wydatek gazów, l/min	45 + 5	50
Odległość natryskiwania, mm	40	70
Prędkość liniowa palnika, mm/s	500	1000
Liczba cykli natryskiwania	W zależności od przebiegu procesu, po każdym cyklu proces był przerywany i podłoża były chłodzone do ok. 50 °C	W zależności od przebiegu procesu. Kiedy temperatura osiągała 500 °C, proces był przerywany i podłoża były chłodzone do ok. 150 °C
Odległość pomiędzy kolejnymi przejściami palnika, mm	3	10
Średnica otworu wtryskiwacza, mm	0,50	0,15
Ciśnienie wstrzeliwania zawiesiny, MPa	0,04	0,55

W przypadku pomiarów kohezji powłok zastosowane zostało stałe obciążenie węgelnika wynoszące 30 N, a promień jego zaokrąglenia wynosił 50 μm . Długość rysy nie uległa zmianie. W oparciu o wartość przyłożonej siły oraz szerokość szczeliny powstałej podczas zarysowania powłoki możliwe było wyliczenie sił kohezji. W tym celu użyto poniższego wzoru (tzw. *scratch hardness*), który można wykorzystać do obliczeń kohezji powłok (zgodnie z normą ASTM G171-03):

$$HS_L = \frac{8 \cdot L}{\pi \cdot d^2}$$

gdzie:

HS_L – twardość opisująca kohezję w warstwie (*scratch hardness*) Pa

L – przyłożona siła N

d – szerokość kanału rysy m.

Wyniki badań

Mikrostruktura powłok

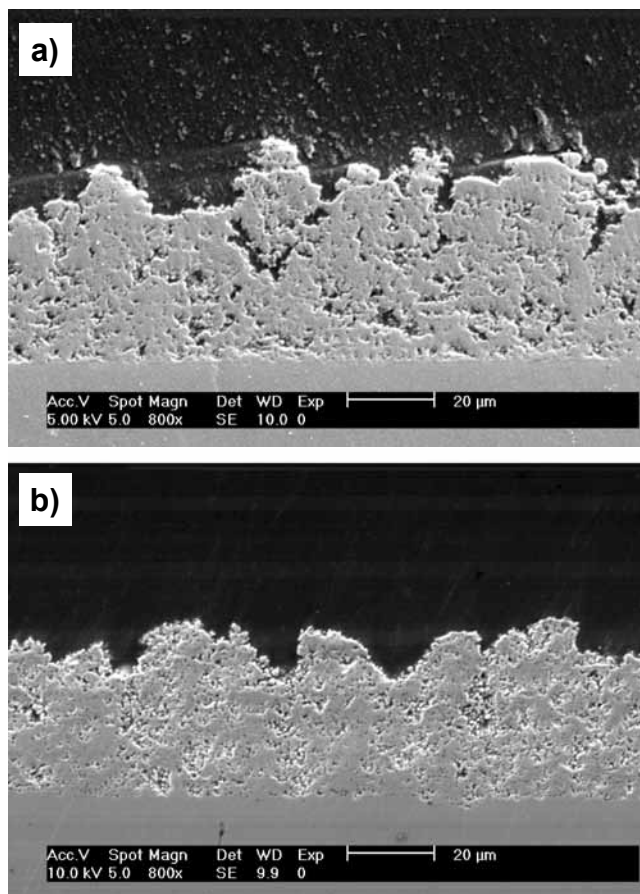
Wykonane badania dotyczące określenia mikrostruktury powłok pokazały, że osiągnięto zakładaną grubość powłok. Na podstawie analizy komputerowej zdjęć wykonanych z użyciem mikroskopu skaningowego stwierdzono, że powłoki charakteryzowały się znaczną porowatością, wynoszącą odpowiednio 18,8% oraz 16,7% dla palników SG-100 oraz Triplex (tabl. II). Warto zwrócić uwagę na fakt, że powłoki wykonane z użyciem jednokatodowego palnika SG-100 charakteryzowały się większym odchyleniem standardowym zarówno w przypadku pomiarów grubości, jak i porowatości.

Ponadto analiza zdjęć SEM pozwoliła stwierdzić, że powłoki natryskiwane z użyciem palnika SG-100 odznaczają się bardziej rozwiniętą powierzchnią oraz bardziej nieregularną strukturą niż powłoki wykonane na stanowisku Triplex. Bardzo interesujący okazał się rozkład porów w powłokach uzyskanych na stanowisku Triplex, które były ułożone prostopadle do podłoża. Powłoki nie wykazały pęknięć ani nieciągłości na całym przekroju (rys. 4). W dalszej kolejności przeprowadzone zostały badania XRD przygotowanych powłok. Po procesie natryskiwania powłoki charakteryzowały się nadal strukturą w pełni regularną.

Tablica II. Wyniki pomiarów grubości oraz porowatości powłok

Table II. The results of thickness and porosity measurements

Palnik plazmowy	Grubość, μm	Grubość σ , μm	Porowatość, %	Porowatość σ , %
SG-100	54,1	4,7	18,8	2,1
Triplex	51,2	4,0	16,7	1,5

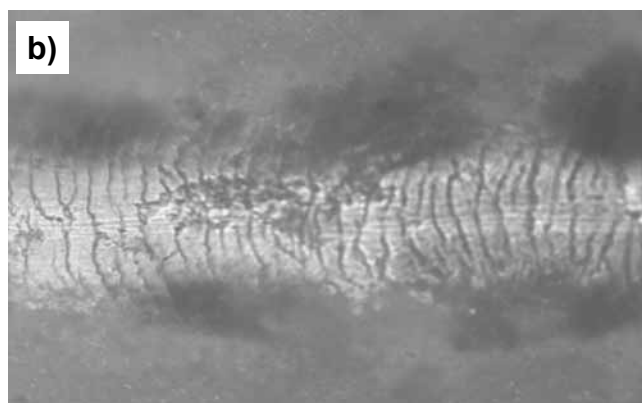
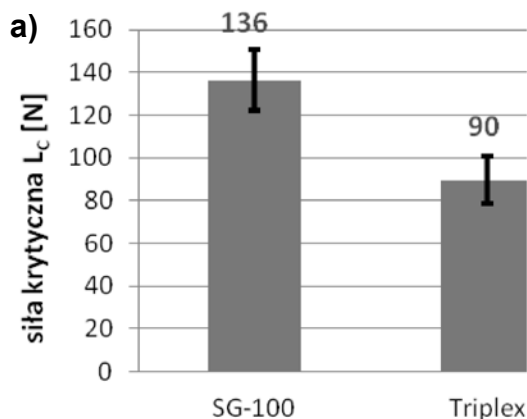


Rys. 4. Mikrostruktura powłok wytworzonych z użyciem: a) palnika SG-100, b) palnika Triplex (SEM, elektrony wtórne)

Fig. 4. The microstructure of coatings deposited by: a) SG-100, b) Triplex plasma torch (SEM, secondary electrons)

Właściwości mechaniczne

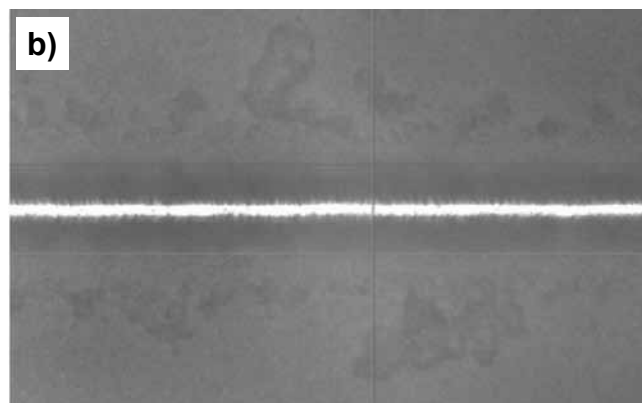
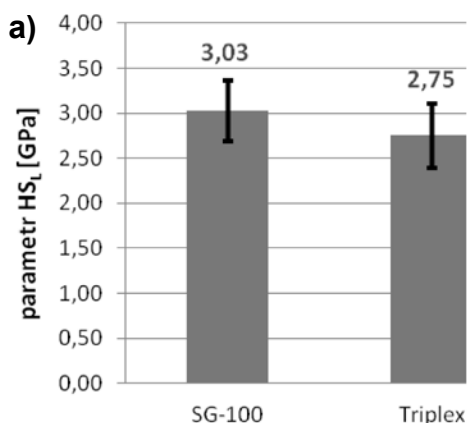
Badania wykonane w celu określenia przyczepności powłok wykazały, że pierwsze oznaki uszkodzenia powłok nastąpiły przy dość wysokich siłach obciążających. W przypadku powłok wykonanych z użyciem palnika SG-100 było to nawet 150 N, natomiast dla powłok naniesionych z użyciem palnika Triplex wartość siły krytycznej, L_c , nie przekroczyła 100 N (rys. 5). Różnice zanotowane w poszczególnych pomiarach adhezji były dość podobne, co skutkowało odchyleniem standardowym na poziomie 10% wartości mierzonych. Warto odnotować fakt, że charakter uszkodzenia powłok był bardzo lokalny, w całym zakresie pomiarowym nie zaobserwowano całkowitego zerwania powłoki z podłoża stalowego.



Rys. 5. Siła krytyczna L_c , opisująca adhezję: a) wyniki pomiarów, b) miejsce określenia siły krytycznej
Fig. 5. Critical load L_c , described adhesion: a) measurements results, b) place of the failure of coatings

Podobnie jak w przypadku wartości przyczepności, tak również siły spójności okazały się wyższe dla powłok naniesionych z użyciem palnika SG-100, dla których parametr HS_L opisujący wartość kohezji osiągnął wartości ponad 3 GPa (rys. 6). W przypadku powłok

wykonanych na stanowisku wyposażonym w palnik trzykatodowy wartości wspomnianego parametru były na poziomie 2,75 GPa. Uzyskane wartości także zmieniły się w niewielkim zakresie, o czym świadczą stosunkowo małe wartości odchylenia standardowego.



Rys. 6. Kohezja w powłokach: a) wyniki pomiarów, b) widok szerokości kanału rysy
Fig. 6. Cohesion in the coatings: a) measurements results, b) the view of the scratches' width

Omówienie wyników

Wnikliwa analiza mikrostruktury powstałych powłok wykazała obecność tzw. dwustrefowej mikrostruktury [10], charakterystycznej dla natryskiwania metodą SPS. Porowatość, mimo że jest na poziomie kilkunastu procent, charakteryzuje się mikrometrycznymi wymiarami porów. W poprzednich badaniach zauważono, że pomimo wysokiej porowatości (mikroporowatości), wartość przewodności cieplnej natryskiwanych powłok była wyraźnie niższa niż dla powłok natryskiwanych metodą APS czy EB-PVD, szczególnie w [23].

Właściwości mechaniczne badanych powłok, określone w teście zarysowania, nie wykazały znaczących różnic (dla pojedynczej próbki). Może to świadczyć o dobrej jednorodności otrzymanych powłok oraz izotropii wyższej od wspomnianych właściwości. Pomimo większej wartości porowatości, powłoki natryskiwane palnikiem SG-100 wykazują lepsze właściwości mechaniczne od otrzymanych przy zastosowaniu palnika Triplex. Prawdopodobnie wynika to z mniejszej odległości natryskiwania (tabl. I), która spowodowała lepsze połączenia pomiędzy lamelami oraz przetopionymi lamelami a podłożem.

*Autorzy składają podziękowania prof. Lechowi Pawłowskiemu za użyteczne dyskusje oraz możliwość przeprowadzenia części badań na Uniwersytecie Limoges we Francji.
 Autorzy składają podziękowania firmie Labsoft za udostępnienie urządzenia pomiarowego Revestest (CSM Instrument).*

Podsumowanie

Metodą natryskiwania plazmowego z zawiesin wytworzono powłoki tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru. Fazę stałą w zawieszynie stanowił submikrometryczny proszek o handlowej nazwie Tosoh TZ-8YS, natomiast faza ciekła to mieszanina wody destylowanej i etanolu (w stosunku wagowym 1:1). Do natryskiwania powłok wykorzystano dwa różne stanowiska (palniki plazmowe, sposób podawania zawiesiny, ruch palnika względem podłoża) i określono osobno dla każdego z nich parametry procesu. Mikrostrukturę otrzymanych powłok analizowano przy użyciu skanin-

owego mikroskopu elektronowego oraz dyfraktometrii rentgenowskiej. Powłoki miały średnią porowatość 18,8% (SG-100) oraz 16,7% (Triplex). Struktura powłok była regularna. Właściwości mechaniczne określono w teście zarysowania. Wartości siły krytycznej, jak i parametru opisującego kohezję były większe dla powłok natrykiwanych palnikiem SG-100. Wynika to prawdopodobnie z krótszej odległości natryskiwania.

Przyszłe badania powinny dotyczyć pomiarów twardości (mikrotwardości) oraz określenia modułu sprężystości podłużnej powłok.

Literatura

- [1] Kelsall R.W., Hamley I.W., Geoghegan M.: Nanotechnology, PWN, Warszawa, 2008.
- [2] Pawłowski L.: The science and engineering of thermal spray coatings, 2nd ed. Wiley, Chichester, England, 2008.
- [3] Gitzhofer F., Bouyer E.: Boulos M.I., Suspension plasma spraying, US Patent no. 5 609 921, 1997.
- [4] Lima R.S., Marple B.R.: Thermal spray coatings engineered from nanostructured ceramic agglomerated for structural, thermal barrier and biomedical applications: a review, Journal of Thermal Spray Technology, 16 (2007), 40-63.
- [5] Clake D.R., Levi C.G.: Materials design for the next generation thermal barrier coatings, Annual Review of Materials Science, 33 (2003), 383-417.
- [6] Delbos C., Fazilleau J., Rat V., Coudert J.F., Fauchais P., Pateyron B.: Phenomena involved in suspension plasma spraying, part 2: zirconia particle treatment and coating formation, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 26 (2006), 393-414.
- [7] Fauchais P., Etchart-Salas R., Rat V., Coudert J.F., Caron N., Wittmann-Teneze K.: Parameters controlling liquid plasma spraying: solutions, sols or suspensions, Journal of Thermal Spray Technology, 17 (2008), 31-59.
- [8] Pawłowski L.: Finely grained nanometric and submicrometric coatings by thermal spraying: A review, Surface and Coatings Technology, 202 (2008), 4318-4328.
- [9] Łatka L., Kozerski S., Pawłowski L., Chicot D.: Właściwości mechaniczne warstw hydroksyapatytu natryskanych plazmowo z zawiesin, Przegląd Spawalnictwa, 9 (2012), 73-78.
- [10] Kozerski S., Pawłowski L., Jaworski R., Roudet F., Petit F.: Two zones microstructure of suspension plasma sprayed hydroxyapatite coatings, Surface and Coatings Technology, 204 (2010) 1380-1387.
- [11] Łatka L., Goryachev S., Kozerski S., Pawłowski L.: Sintering of fine particles in suspension plasma sprayed coatings, Materials (open access journal) 3 (2007), 3845-3866.
- [12] Vassen R., Kassner H., Mauer G., Stoever D.: Suspension plasma spraying: process characteristics and applications, Journal of Thermal Spray Technology, 19 (2010), 219-225.
- [13] Killinger A., Gadow R., Mauer G., Guignard A., Vassen R., Stover D.: Review of new developments in suspension and solution precursor thermal spray processes, Journal of Thermal Spray Technology, 20 (2011), 677-695.
- [14] Fauchais P., Montavon G.: Latest developments in suspension and liquid precursor thermal spraying, Journal of Thermal Spray Technology, 19 (2010), 226-239.
- [15] Vassen R., Stoever D.: Conventional and new materials for thermal barrier coatings in functional gradient materials and surface layers prepared by fine particles technology, NATO Science Series, 16 (2001), 199-216.
- [16] Cao X.Q., Vassen R., Stoever D.: Ceramic materials for thermal barrier coatings, Journal of the European Ceramic Society, 24 (2004), 1-10.
- [17] Pawłowski L.: Strategic oxides for thermal spraying: problems of availability and evolution of prices, Surface and Coatings Technology, 220 (2013), 14-19.
- [18] Jordan E.H., Xie L., Ma X., Gell M., Pature N.P., Cetegen B., Oztruk A., Roth J., Xiao T.D., Bryant P.E.C.: Superior thermal barrier coatings using solution precursor plasma spray, Journal of Thermal Spray Technology, 13 (2004), 57-65.
- [19] Bacciochini A., Ben-Ettouil F., Brousse E., Ilavsky J., Montavon G., Denoirjean A., Valette S., Fauchais P.: Quantification of void network of as-sprayed and annealed nanostructured YSZ deposits manufactured by suspension plasma spraying, Surface and Coatings Technology, 205 (2010), 683-689.
- [20] Pature N.P., Schlichting K.W., Bhaitia T., Oztruk A., Cetegen B., Jordan E.H., Gell M., Jiang S., Xiao T.D., Strutt P.R., Garcia E., Miranzo P., Osendi M.I.: Towards durable thermal barrier coatings with novel microstructures deposited by solution precursor plasma spray, Acta Materialia, 49 (2001), 2251-2257.
- [21] American Ceramic Society, Progress in thermal barrier coatings, Wiley, Chichester, England, 2009.
- [22] Zetasizer Nano Series, chapter 16, Zeta Potential theory.
- [23] Łatka L., Cattini A., Pawłowski L., Valette S., Pateyron B., Lecomte J.P., Kumar R., Denoirjean A.: Thermal diffusivity and conductivity of yttria stabilized zirconia coatings obtained by suspension plasma spraying, Surface and Coatings Technology, 208 (2012), 87-91.