

# Powłoki ceramiczne $\text{Al}_2\text{O}_3$ otrzymywane w technologii natryskiwania cieplnego plazmowego APS

dr inż. Aleksander Iwaniak, ORCID: 000-0002-3759-9075

Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Śląska, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

## Słowa kluczowe

natryskiwanie cieplne plazmowe, APS, powłoki  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , zużycie tribologiczne, mikrostruktura powłok

## Key words

Atmospheric Plasma Spraying, APS,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coatings, tribological wear, microstructure of coatings

## Streszczenie

W pracy wytworzono ceramiczne powłoki z proszku tlenku aluminium i proszku tlenku aluminium z dodatkiem 5% proszku tlenku tytanu z wykorzystaniem technologii natryskiwania plazmowego APS. Stwierdzono, że dodatek 5% proszku tlenku tytanu  $\text{TiO}_2$  do proszku tlenku aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powoduje spadek porowatości natryskiwanej powłoki z 5,9 % do 3,5%. Ponadto tlenek tytanu dodany do tlenku aluminium zmniejsza twardość natryskiwanej powłoki z 988 HV0,3 do 935 HV0,3. Wykonane badania zużycia tribologicznego wytworzonych powłok z skojarzeniem z pinem z węgliku krzemu SiC wykazały, że dodatek tlenku tytanu powoduje zmniejszenie współczynnika tarcia badanego skojarzenia w warunkach tarcia suchego - współczynnik  $\mu$  zmalał z wartości  $\mu=0,37$  do  $\mu=0,26$ .

## Summary

### Ceramic coatings $\text{Al}_2\text{O}_3$ obtained using APS plasma thermal spraying technology

In this work, ceramic coatings were produced from aluminum oxide powder and aluminum oxide powder with the addition of 5% titanium oxide powder using APS plasma spraying technology. It was found that the addition of 5% titanium oxide  $\text{TiO}_2$  powder to aluminum oxide powder  $\text{Al}_2\text{O}_3$  causes a decrease in the porosity of the sprayed coating from 5.9% to 3.5%. Moreover, titanium oxide added to aluminum oxide reduces the hardness of the sprayed coating from 988 HV0.3 to 935 HV0.3. Tribological wear tests of coatings produced in combination with a SiC silicon carbide pin showed that the addition of titanium oxide causes a reduction in the friction coefficient of the tested combination under dry friction conditions - the  $\mu$  coefficient decreased from  $\mu=0.37$  to  $\mu=0.26$ .

## 1. Wprowadzenie

Wymagania stawiane metalicznym materiałom konstrukcyjnym i funkcjonalnym stosowanym w budowie elementów maszyn i urządzeń w wielu aplikacjach przemysłowych są coraz wyższe. Przykładem może tu być przemysł energetyczny, maszynowy, lotniczy oraz medycyna. Oczekuje się, że tworzywo konstrukcyjne będzie miało wysoką wytrzymałość mechaniczną przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej plastyczności i wysokiej odporności na szereg czynników niszczących, jak: korozja, zużycie tribologiczne czy niszczenie erozyjne. Uzyskanie litych materiałów spełniających wszystkie powyższe kryteria jest z punktu widzenia technicznego i ekonomicznego praktycznie niemożliwe. Efektywnym, i często jedynym skutecznym sposobem, podniesienia właściwości użytkowych metalicznych tworzyw konstrukcyjnych i funkcjonalnych, takich jak: odporność korozyjna, odporność na zużycie przez tarcie czy odporność na niszczenie erozyjne, są technologie inżynierii powierzchni, mające na celu wytworzenie właściwej do warunków pracy materiału powłoki ochronnej. Nowoczesne powłoki techniczne pozwalają wydłużyć czas bezawaryjnej i międzyremontowej eksploatacji maszyn, urządzeń i całych instalacji, w tym środków transportu. Dzięki temu można wydłużyć czas życia wyrobów i zapewnić ciągłą bezawaryjną pracę w trudnych, często bardzo złożonych, warunkach eksploatacyjnych [1-4].

Istnieje szereg metod wytwarzania powłok ochronnych i technicznych. W warunkach przemysłowych od wielu lat z powodzeniem stosowane są technologie natryskiwania cieplnego powłok na metaliczne elementy konstrukcyjne.

Jedną z najbardziej zaawansowanych metod natryskiwania cieplnego jest natryskiwanie naddźwiękowe HVOF (z ang. High Velocity Oxygen Fuel) i HVAF (z ang. High Velocity Air-Fuel) [5, 6, 7, 8] oraz natryskiwanie plazmowe APS (z ang. Atmospheric Plasma Spraying) [9, 10, 11, 12]. Ta ostatnia metoda dedykowana jest przede wszystkim do nakładania ceramicznych powłok tlenkowych, np.: z tlenku aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), z tlenku chromu ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), z tlenku tytanu ( $\text{TiO}_2$ ) czy z dwutlenku cyrkonu ( $\text{ZrO}_2$ ). Pozwala ona na wytwarzanie ceramicznych warstw tlenkowych charakteryzujących się m.in. wysoką twardością i odpornością na ścieranie. Powłoki ceramiczne otrzymywane tą metodą odznaczają się również bardzo dobrą odpornością korozyjną, także w wysokich temperaturach. Metoda ta z powodzeniem jest stosowana w najbardziej zaawansowanych aplikacjach w przemyśle lotniczym, kosmonautyce, transporcie czy medycynie. Natryskiwanie plazmowe stosowane jest m. in. do wytwarzania powłokowych barier cieplnych (TBC) na łopatkach silników odrzutowych i bioaktywnych powłok hydroksyapatytowych (HAp) na implantach długoterminowych, jak np. endoprotezy stawu biodrowego [13, 14, 15, 16].

Natryskiwanie plazmowo powłoki ceramiczne z tlenku glinu charakteryzują się dobrą odpornością na ścieranie, erozję i zużycie ślizgowe. Są doskonałymi izolatorami i posiadają dobrą odporność na korozję w różnych środowiskach. Autorzy w swoich pracach [17-21] stwierdzili, że w powłokach z tlenku glinu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  natryskiwanych plazmowo dodatek tlenku tytanu  $\text{TiO}_2$ , w zależności od ilości tego drugiego, może zwiększać lub zmniejszać twardość powłoki. W pracach tych wskazano także,

## NAUKA

że odporność na zużycie ściernie powłok domieszkowanych tlenkiem tytanu wzrastała w stosunku do powłoki bazowej  $Al_2O_3$  z czystego tlenku aluminium, pomimo spadku twardości powłoki. Zaobserwowano, że dodatek tlenku tytanu może powodować spadek współczynnika tarcia natryskiwanej powłoki  $Al_2O_3$ .

### 2. Materiał do badań - wytworzenie powłok

W niniejszej pracy metodą natryskiwania plazmowego w atmosferze powietrza (APS) wytworzono na próbkach płaskich ze stali X6CrNiMoTi17 (dyski o wymiarach: średnica 60 mm, grubość 5mm) powłokę ceramiczną z tlenku aluminium  $Al_2O_3$  oraz z tlenku aluminium z 5% dodatkiem tlenku tytanu  $Al_2O_3-5\%TiO_2$ . Do natryskiwania cieplnego użyto komercyjnych proszków  $Al_2O_3$  i  $TiO_2$  oraz NiAl (tabela 1.). Mieszaninę proszku  $Al_2O_3-5\%TiO_2$  zestawiono wagowo i mieszano w młynku przed umieszczeniem w podajniku proszku instalacji do natryskiwania. W celu podniesienia przyczepności powłok, a także kompensacji różnic temperaturowych współczynników rozszerzalności cieplnej zastosowano pomiędzy zewnętrzną warstwą ceramiczną a materiałem metalicznego podłoża międzywarstwę podkładową NiAl.

Rodzaj proszku	Symbol proszku	Wielkość uziarnienia* [ $\mu m$ ]
$Al_2O_3$	Amperit 740.001	45/22
$TiO_2$	Amperit 155.086	<63
NiAl (80/20)	Amperit 250.002	90/45

\* dane producenta proszku

Tab. 1. Proszki użyte do natryskiwania ceramicznych powłok

Powłoki naniesione zostały za pomocą palnika F4 i instalacji Multi-Process Spray System. Powierzchnia materiału podłoża przed natryskiwaniem cieplnym została poddana obróbce strumieniowo-ściernej celem usunięcia zanieczyszczeń i rozwinięcia powierzchni. Natryskiwanie wykonano przy parametrach, których wartości przedstawiono w tabeli 2.

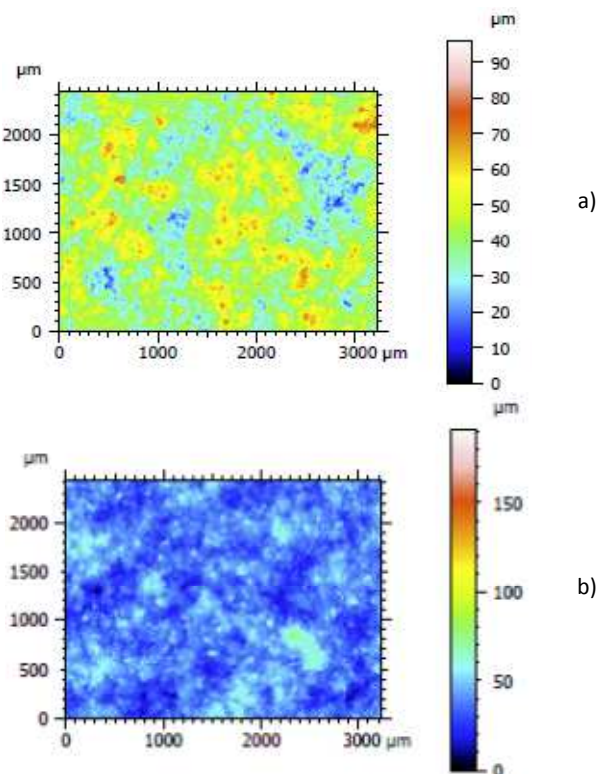
Wartości parametrów dla danego rodzaju warstwy				
Parametry	Jednostka	NiAl	$Al_2O_3$	$Al_2O_3-5\%TiO_2$
Natężenie prądu łuku	[A]	470÷490	511÷595	540÷620
Odległość palnika od natryskiwanej powierzchni	[mm]	100÷140	100÷115	100÷115

Tab. 2. Zastosowane parametry procesowe natryskiwania plazmowego APS

### 3. Wyniki badań i ich analiza

Po procesie natryskiwania cieplnego określono topografię powierzchni powłok z użyciem profilometru 3D firmy Sensofar - zmierzono między innymi parametry  $R_a$  i  $R_z$ . Na rys. 1. przedstawiono uzyskane mapy powierzchni 2D natryskiwanych

powłok, zaś na rys. 2 zmierzone parametry powierzchniowe. Obie powłoki charakteryzowały się zbliżoną topografią powierzchni, a parametry powierzchniowe miały podobne wartości bez jednoznacznego wskazania na korzyść konkretnej warstwy. Dla przykładu: parametr  $R_a$  dla powłoki  $Al_2O_3$  wynosił 5,16  $\mu m$ , a dla powłoki  $Al_2O_3-5\%TiO_2$  4,98  $\mu m$ , zaś parametr  $R_z$  dla powłoki  $Al_2O_3$  miał wartość 31,31  $\mu m$ , podczas gdy dla powłoki  $Al_2O_3-5\%TiO_2$  było to 32,20  $\mu m$ .



Rys. 1. Mapa powierzchni 2D natryskiwanych powłok uzyskana za pomocą profilometru 3D; a) powłoka  $Al_2O_3$ ; b) powłoka  $Al_2O_3-5\%TiO_2$

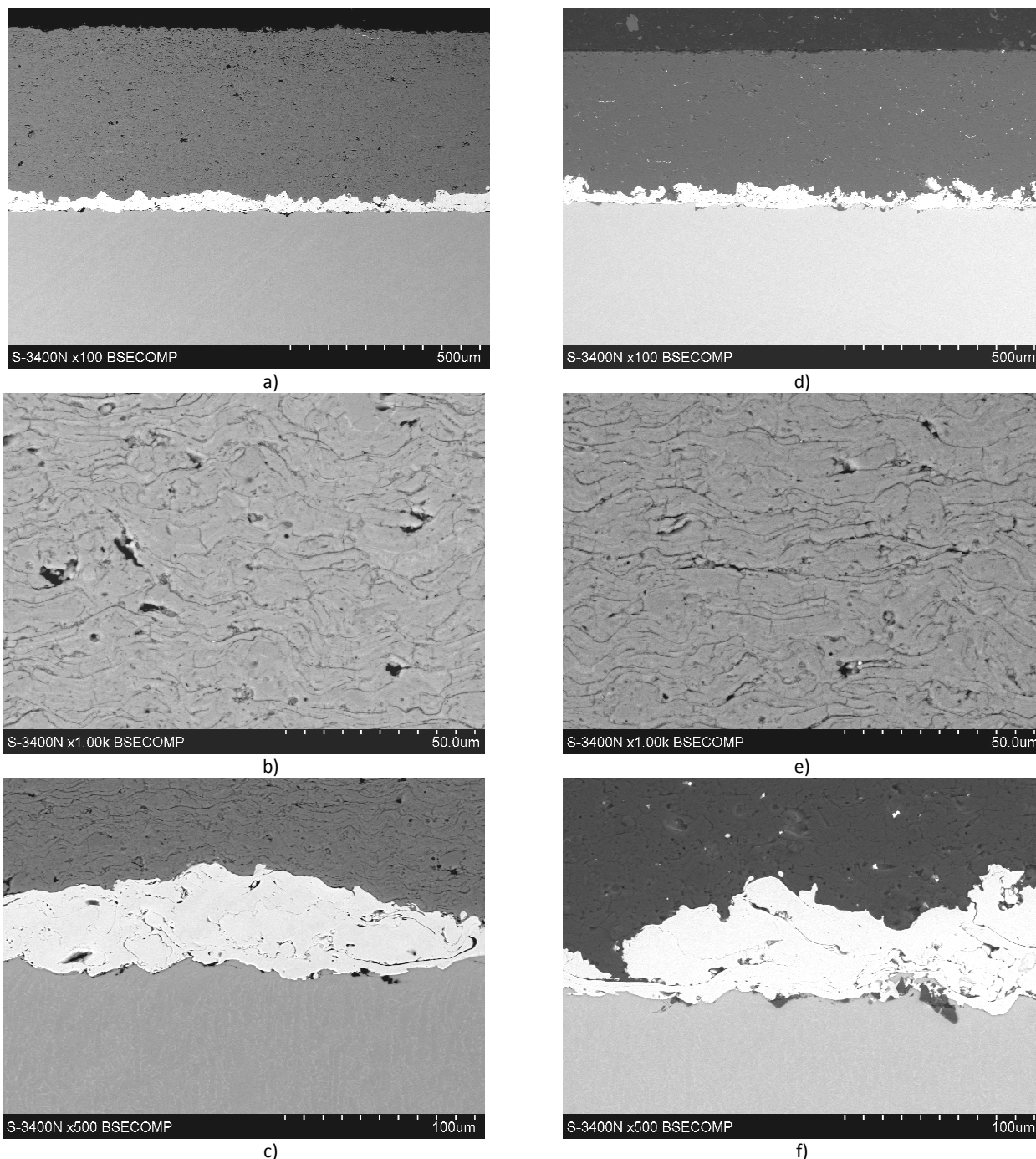
ISO 4287	
Parametry amplitudy - profil chropowatości	
$R_p$	16.2350 $\mu m$ Filtr gaussowski, 0.8 mm
$R_v$	15.0820 $\mu m$ Filtr gaussowski, 0.8 mm
$R_z$	31.3170 $\mu m$ Filtr gaussowski, 0.8 mm
$R_c$	13.9618 $\mu m$ Filtr gaussowski, 0.8 mm, Bez poprawki ISO...
$R_t$	40.4515 $\mu m$ Filtr gaussowski, 0.8 mm
$R_a$	5.16585 $\mu m$ Filtr gaussowski, 0.8 mm
$R_q$	6.40298 $\mu m$ Filtr gaussowski, 0.8 mm
$R_{sk}$	0.306787 Filtr gaussowski, 0.8 mm
$R_{ku}$	2.80682 Filtr gaussowski, 0.8 mm
Parametry stosunku materiałowego - profil chropowatości	
$R_{mr}$	0.461670 % $c = 1 \mu m$ pod najwyższym pikiem, Filtr gaus...
$R_{dc}$	10.5248 $\mu m$ $p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtr gaussowski, 0.8 mm

ISO 4287	
Parametry amplitudy - profil chropowatości	
$R_p$	18.3482 $\mu m$ Filtr gaussowski, 0.8 mm
$R_v$	13.8565 $\mu m$ Filtr gaussowski, 0.8 mm
$R_z$	32.2046 $\mu m$ Filtr gaussowski, 0.8 mm
$R_c$	13.6045 $\mu m$ Filtr gaussowski, 0.8 mm, Bez poprawki ISO...
$R_t$	45.0420 $\mu m$ Filtr gaussowski, 0.8 mm
$R_a$	4.98988 $\mu m$ Filtr gaussowski, 0.8 mm
$R_q$	6.44346 $\mu m$ Filtr gaussowski, 0.8 mm
$R_{sk}$	0.299570 Filtr gaussowski, 0.8 mm
$R_{ku}$	4.23536 Filtr gaussowski, 0.8 mm
Parametry stosunku materiałowego - profil chropowatości	
$R_{mr}$	0.317628 % $c = 1 \mu m$ pod najwyższym pikiem, Filtr gaus...
$R_{dc}$	10.3304 $\mu m$ $p = 20\%$ , $q = 80\%$ , Filtr gaussowski, 0.8 mm

Rys. 2. Zmierzone parametry powierzchniowe za pomocą profilometru 3D; a) powłoka  $Al_2O_3$ ; b) powłoka  $Al_2O_3-5\%TiO_2$

Celem obserwacji struktury powłok z natrykiwanych dysków wycięto próbki o wymiarach 15x 15 mm i wykonano z nich zglądy metalograficzne poprzeczne. Próbki zostały najpierw wymyte w acetonie, w płuczce ultradźwiękowej celem usunięcia zanieczyszczeń i odtłuszczenia. Aby wykonać zglądy metalograficzne próbki zainkludowano w żywicy przewodzącej prąd na specjalistycznej wyprasce LECO PR-15. W kolejnym etapie zglądy szlifowano na papierach ściernych o gradacji od 120 do 800. Po szlifowaniu zglądy polerowano z użyciem pasty polerskiej na bazie zawiesiny  $Al_2O_3$ .

Obserwacje mikrostruktury natrykiwanych powłok przeprowadzono za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego HITACHI S3400N (SEM). Struktury warstw obserwowano m.in. w technice SE, BSECOMP. Mikroskop był wyposażony w przystawkę do mikroanalizy rentgenowskiej firmy Thermo Noran System SIX (EMPA - Energy Dispersive Spectrometry - detektor EDS). Obrazy obserwowano przy powiększeniach  $50 \div 2000x$  i napięciu katody w zakresie  $15 \div 25kV$ . Na rys. 3. zamieszczono obserwowane mikrostruktury badanych powłok na SEM.



Rys. 3. Mikrostruktura wytworzonych powłok (przekrój poprzeczny, zgląd nietrawiony, SEM); a, b, c)  $Al_2O_3$ ; d, e, f)  $Al_2O_3$ -5% $TiO_2$

Badania mikrostrukturalne wykazały, że obie powłoki są prawidłowo nałożone, bez nieciągłości i wad, dobrze przylegają do metalicznego podłoża, a ich grubość wynosi odpowiednio  $240 \mu m$  i  $205 \mu m$  (rys. 3).

Zmierzone porowatości wytworzonych powłok. W trakcie obserwacji struktury powłok na mikroskopie świetlnym Olympus GX71 wykonano zdjęcia ich struktury (powiększenie 50x, 10 obszarów z każdego zglądu). Wykorzystano je

## NAUKA

następnie do wyliczenia porowatości - użyto w tym celu specjalistycznego programu do metalografii ilościowej Metllo. Wyliczona średnia porowatość wynosiła dla powłoki z tlenku aluminium  $Al_2O_3$  5,9 %, a dla warstwy  $Al_2O_3$  z dodatkiem 5% tlenku tytanu  $TiO_2$  3,5% (odchylenie standardowe odpowiednio: 1,3 i 0,9).

Twardość natrykiwanych powłok zmierzono metodą Vickersa przy obciążeniu 300g na mikrotwardościomierzu Duramin A300. Pomiary wykonywano na zglądach poprzecznych. Otrzymane wyniki jednostkowe (po 10 dla każdej powłoki) uśredniono. Średnia twardość powłoki z tlenku aluminium  $Al_2O_3$  wynosiła 988 HV0,3, a dla warstwy  $Al_2O_3$  z dodatkiem tlenku tytanu  $TiO_2$  935 HV0,3 (odchylenie standardowe odpowiednio: 61 i 58). Zaobserwowano spadek twardości powłoki z dodatkiem tlenku tytanu w stosunku do powłoki z czystego tlenku aluminium. Otrzymane wyniki pokrywają się z danymi literaturowymi w tym zakresie - nawet niewielka ilość tlenku tytanu w proszku do natrykiwania obniża twardość powłoki a tlenku aluminium.

W ramach badań przeprowadzono testy odporności na zużycie przez tarcie (badania tribologiczne) przedmiotowych powłok metodą „ball on disc” na tribometrze T01. Schemat węzła tarcia zamieszczono na rys. 4. Po nałożeniu powłok na próbkach (dyskach) ich powierzchnie przed testem tarcia szlifowano, aby uzyskać jednorodną, gładką powierzchnię. Po obróbce zmierzone wartości parametrów  $R_a$  i  $R_z$  były dla obu powłok następujące:

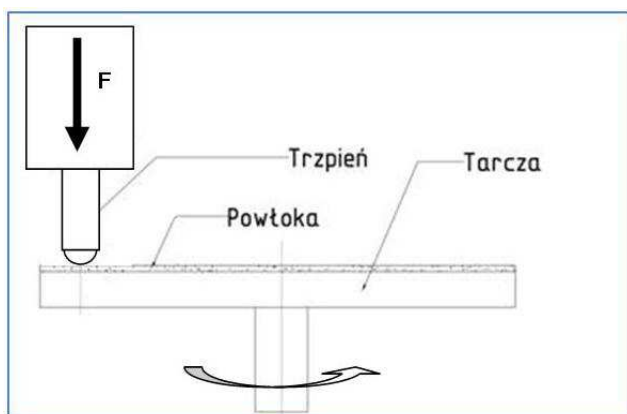
- powłoka  $Al_2O_3$ :  $R_a = 0,15 \mu m$ ,  $R_z = 0,46 \mu m$
- powłoka  $Al_2O_3$  z dodatkiem tlenku tytanu  $TiO_2$ :  $R_a = 0,09 \mu m$ ,  $R_z = 0,32 \mu m$ .

Jako pin zastosowano spiekany węgiel krzemu SiC (twardość 2500 HV) - kulka SiC o średnicy 3 mm.

Parametry testu były następujące:

- prędkość obrotowa dysku  $v=1 \text{ m/s}$ ;
- dystans (droga)  $l=2000\text{m}$ ;
- obciążenie  $F=5\text{N}$ .

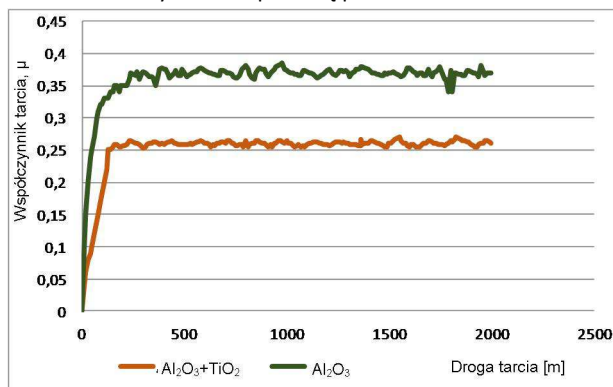
Zużycie powłok ceramicznych określono metodą wagową, ważąc oczyszczone alkoholem etylowym próbki i przeciwpróbki na wadze elektronicznej HM-300 o zakresie pomiarowym 310 g i dokładności 0,0002 g.



Rys. 4. Schemat węzła tarcia zastosowanego w badaniach zużycia tribologicznego

Na rys. 5. przedstawiono zarejestrowane w trakcie testów współczynniki tarcia badanych par trących. Dla powłoki z tlenku aluminium  $Al_2O_3$  zmierzony współczynnik tarcia wyniósł  $\mu=0,37$ , zaś dla powłoki z  $Al_2O_3$  z dodatkiem tlenku tytanu  $TiO_2$   $\mu=0,26$ .

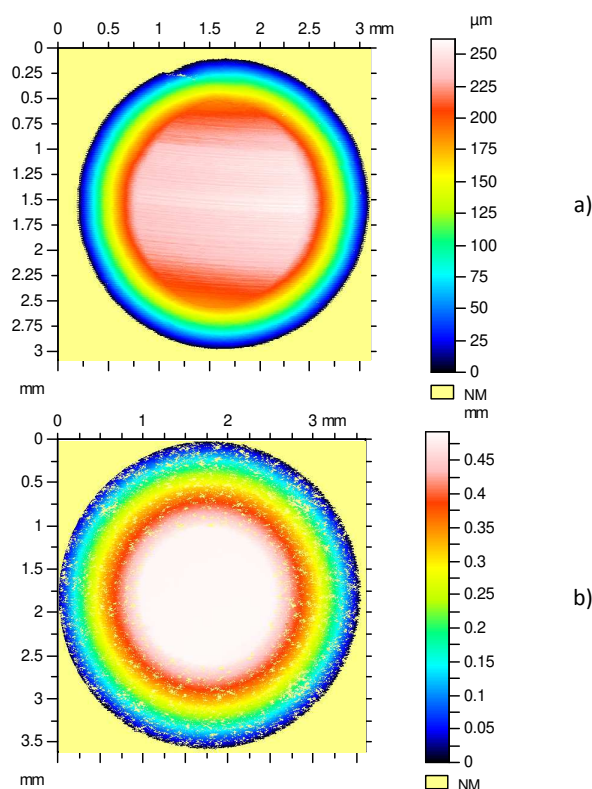
Na rys. 6 przedstawiono mapy powierzchni 2D pinów po teście tarcia uzyskane za pomocą profilometru 3D.



Rys. 5. Współczynnik tarcia zarejestrowany przy współpracy natrykiwanych plazmowo powłok z pinem z SiC

Powłoka	Promień tarcia [mm]	Droga tarcia [m]	Obciążenie [N]	Ubytek masy [g]	
				tarczy	pinu
$Al_2O_3$	35	2000	5	0,0020	0,004
$Al_2O_3-TiO_2$	35	2000	5	0,0013	0,003

Tab. 3. Wartości ubytku masy tarcz  $Al_2O_3$  i  $Al_2O_3+5\%TiO_2$  oraz pinów SiC



Rys. 6. Mapy powierzchni 2D pinów po teście tarcia uzyskane za pomocą profilometru 3D

Na podstawie wyników badań tribologicznych oraz analizy powierzchni roboczych tarcz i pinów zauważono, że zużycie obu pinów było na podobnym poziomie, natomiast zużycie tarczy pokrytej powłoką z czystego tlenku aluminium  $Al_2O_3$  było większe (0,0019 g) w odniesieniu do tarczy pokrytej

powłoką z tlenku aluminium z domieszką 5% tlenku tytanu  $\text{TiO}_2$  (0,0013 g). W skojarzeniu powłoka  $\text{Al}_2\text{O}_3+5\%\text{TiO}_2$  - pin SiC współczynnik tarcia jest mniejszy niż w skojarzeniu powłoka  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - pin SiC i wynosi on średnio  $\mu=0,26$ , podczas gdy dla powłoki z  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jest na średnim poziomie  $\mu=0,37$ . Na kulce współpracującej z powłoką  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (rys. 6a.) zaobserwowano ślady zużywania ściernego SiC - rysy wzdłuż kierunku ruchu. Dodatek tlenku tytanu do tlenku aluminium skutkuje zmniejszeniem współczynnika tarcia badanego skojarzenia tarcia (węzła tarcia). Ponadto zmniejsza on porowatość powłoki (prawie dwukrotnie) oraz jej twardość. Porowatość powłok wpływa na ich chropowatość po obróbce wykańczającej po procesie natryskiwania cieplnego - powłoka  $\text{Al}_2\text{O}_3$  miała  $R_a = 0,15 \mu\text{m}$ , zaś powłoka  $\text{Al}_2\text{O}_3$  z dodatkiem tlenku tytanu  $\text{TiO}_2$   $R_a = 0,09 \mu\text{m}$ . Parametr  $R_z$  zachowywał się podobnie. Wyższa porowatość skutkuje zwiększeniem chropowatości powłoki i zwiększeniem współczynnika tarcia w warunkach tarcia technicznie suchego. Wyższa wartość porowatości powłoki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  w porównaniu do powłoki  $\text{Al}_2\text{O}_3-5\%\text{TiO}_2$  niekoniecznie musi być w każdej sytuacji wadą - w zależności od aplikacji pory na powierzchni elementu pracującego w skojarzeniu tarciovym mogą pełnić np. rolę zasobników smaru w trakcie eksploatacji urządzenia, co w takim przypadku będzie korzystne.

#### 4. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wyciągnięto następujące wnioski:

1. Dodatek tlenku tytanu  $\text{TiO}_2$  w ilości 5% do proszku tlenku aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$  skutkuje zmniejszeniem porowatości wytworzonej powłoki ceramicznej w procesie natryskiwania plazmowego APS - odpowiednio z 5,9 % do 3,5%.
2. Większa porowatość powłoki skutkuje zwiększeniem chropowatości natryskiwanej cieplnie powłoki ceramicznej  $\text{Al}_2\text{O}_3$  po obróbce wykańczającej po procesie natryskiwania - parametry  $R_a$  i  $R_z$  wzrosły.
3. Tlenek tytanu  $\text{TiO}_2$  w ilości 5% dodany do tlenku aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$  zmniejsza twardość natryskiwanej powłoki z 988 HV0,3 do 935 HV0,3 jednocześnie powodując zmniejszenie współczynnika tarcia badanych skojarzeń w warunkach tarcia suchego  $\mu=0,37$  do  $\mu=0,26$ .

#### Podziękowanie

Badania przedmiotowej pracy wykonano w ramach prac badawczych własnych BK Katedry Technologii Materiałowych.

#### Literatura

- 1 A. Rusowicz, *Przegląd metod nakładania powłok ceramicznych na elementy metaliczne*, Szkło i Ceramika, Nr 1/2021, pp. 21-24.
- 2 T. Hejrowski, *Nowoczesne powłoki nakładane cieplnie odporne na zużycie ściernie i erozyjne*, Monografie - Politechnika Lubelska, Lublin 2013.
- 3 S. Morel, *Powłoki natryskiwane cieplnie*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1997.
- 4 A. Klimpel, *Technologie napawania i natryskiwania cieplnego*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
- 5 K. Szymański, G. Moskal, D. Niemiec, A. Iwaniak, J. Wieczorek, *The influence of feedstock powders on microstructure and tribological properties of WC-Co-Cr HFAV coatings*, 45nd ICMCTF International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, April 23-27, 2018, San Diego, USA.
- 6 A. Iwaniak, Ł. Norymberczyk, G. Więclaw, *Nowoczesne powłoki węglkowe natryskiwane cieplnie w technologii HVOF na pierścieniach ślizgowych uszczelnień mechanicznych, Uszczelnienia i technika uszczelniania maszyn i urządzeń: XIV Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna, Wrocław, 31 maja - 1 czerwca 2016. Seals and sealing technology in machines and devices. XIVth International scientific technical conference, 2016, pp.122-131.*
- 7 A. Iwaniak, Ł. Norymberczyk, *The effect of selected laser beam micromilling parameters on the surface layer structure of High velocity oxygen fuel sprayed WC-CoCr coating*, Surface and Coatings Technology, 2019, vol. 378, pp. 1-8, DOI:10.1016/j.surfcoat.2019.125043.
- 8 A. Iwaniak, *Rola wielkości uziarnienia proszku do natryskiwania w kształtowaniu właściwości użytkowych powłok WCCoCr nanoszonych naddźwiękowo na stopie Ti6Al4V*, Ochrona przed Korozją, 2019, vol. R. 62, nr 3, pp. 96-104, DOI:10.15199/40.2019.3.7.
- 9 G. Moskal, A. Iwaniak, B. Witala, *Characterization of microstructure and properties of plasma sprayed ceramic coatings on AZ91 magnesium alloy*, Diffusion in Solids and Liquids VI: International Conference on Diffusion in Solids and Liquids, Paris, 5-7 July 2010, Defect and Diffusion Forum, 2011, vol. 312 - 315, Stafa, Trans Tech Publications, pp. 571-576, DOI:10.4028/www.scientific.net/DDF.312-315.571.
- 10 G. Moskal, A. Iwaniak, A. Rozmysłowska, *Characterization of thermal properties of micro-sized ceramic powders for APS deposition of ceramic layers*, Computational methods in fracture mechanics, Key Engineering Materials, 2011, vol. 484, Stafa-Zurich, Trans Tech Publications, pp.152-157.
- 11 Ch.I. Sarafoglou, D.I. Pantelis, S. Beauvais, M. Jeandin, *Study of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coatings on AISI 316 stainless steel obtained by controlled atmosphere plasma spraying*, Surface & Coatings Technology 202 (2007), pp. 155-161.
- 12 Shunyan Tao, Zhijian Yin, Xiaming Zhou, Chuanxian Ding, *Sliding wear characteristics of plasma-sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  coatings against copper alloy under severe conditions*, Tribology International, No 43(2010), pp. 69-75.
- 13 S. Dudek, T. Gancarczyk, P. Sosnowy, *Zastosowanie natryskiwania cieplnego na przykładzie silnika turbinowego*, Przegląd Spawalnictwa 9/2012, pp. 9-13.
- 14 G. Lubos, A. Iwaniak, *Badania struktury natryskiwanej plazmowo powłoki typu HAp- $\text{TiO}_2$  na implantacyjnym stopie Ti6Al4V*, XXXVII Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków - Krynica, 29.IX - 2.X.2009, 2009, pp.199-204.
- 15 A. Dudek, *Natryskiwane metodą APS powłoki hydroksyapatytowe do zastosowań w implantologii, Ochrona przed korozją, Nr 6, 2022, pp. 182-185, DOI 10.15199/40.2022.6.3.*
- 16 D. Michalik, A. Iwaniak, M. Sozańska, *Badania struktury powłok hydroksyapatytowych nanoszonych metodą natrysku plazmowego, Nowoczesne technologie otrzymywania materiałów ceramicznych i metody ich badań, Materiały międzynarodowej konferencji, Warszawa - Konstancin Jeziorna, 2007, Prace Komisji Ceramicznej. Ceramika, 2008, vol. 101, Polskie Towarzystwo Ceramiczne, s.151-157.*
- 17 K. Habib, J. Saura, C. Ferrer, *Comparison of flame sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  coatings: Their microstructure, mechanical properties and tribology behavior*, Surface and Coatings Technology 201 (2006), pp. 1436-1443.
- 18 R. Yilmaz, A. Kurt, A. Demir, *Effects of  $\text{TiO}_2$  on the mechanical properties of the  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  plasma sprayed coating*, Journal of the European Ceramic Society 27 (2007), pp. 1319-1323.
- 19 Y. Wang, S. Jiang, M. Wang, *Abrasive wear characteristics of plasma sprayed nanostructured alumina-titania coatings*, Wear 237 (2000), pp. 176-185.
- 20 Y. Liua, T. Fischera, A. Dentb, *Comparison of HVOF and plasma-sprayed alumina-titania coatings - microstructure, mechanical properties and abrasion behavior*, Surface and Coatings Technology 167 (2003), pp. 68-76.

## NAUKA

- <sup>21</sup> W. Tian Y. Wang, Y. Yang, Fretting wear behavior of conventional and nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13wt%TiO<sub>2</sub> coatings fabricated by plasma spray, *Wear* 265 (2008), pp. 1700–1707.

### **dr inż. Aleksander Iwaniak**

*Adiunkt w Katedrze Technologii Materiałowych Politechniki Śląskiej w dyscyplinie inżynieria materiałowa*



Abosolwent Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej w Katowicach. Obszar zainteresowań zawodowych dotyczy inżynierii powierzchni materiałów, w tym badania procesów niszczenia materiałów oraz metod poprawy ich własności użytkowych i funkcjonalności poprzez nakładanie powłok

ochronnych i technicznych antykorozyjnych, przeciwzużyciowych (w tym ceramicznych) z wykorzystaniem m.in. technologii natryskiwania cieplnego, napawania laserowego i obróbki elektrochemicznej.

[aleksander.iwaniak@polsl.pl](mailto:aleksander.iwaniak@polsl.pl)