

Ocena jakości i odporności erozyjnej powłok natryskiwanych łukowo

Evaluation of the quality and erosion resistance of arc sprayed coatings

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań odporności erozyjnej powłok natryskiwanych łukowo wybranymi stopami typu Fe-Cr-Ti-Si-Mn, Fe-Cr-B-Si-Mn, Ni-Cr-Mo-Fe-Nb, Ni-WC-Cr-B-C oraz nano stopem na osnowie żelaza wzmocnianym wydzieleniowo węglikiem boru Fe-Si-Mn-Cr-Mo-Nb-W-B, na płyty ze stali niestopowej ASTM A516, Grade 55 przeznaczonej do pracy w podwyższonej temperaturze. Do natryskiwania łukowego zastosowano najnowszej generacji urządzenie spawalnicze Eutronic Arc Spray 4 zapewniające wysoką stabilność przebiegu procesu oraz użyto druty proszkowe metaliczne EuTronic Arc 502, EuTronic Arc 547, EuTronic Arc 595, EuTronic Arc 599 i EnDotec DO*390N o średnicy 1,6 mm. Natryskiwano łukowo powłoki o grubości około 0,8 mm, odznaczające się zróżnicowaną twardością oraz odpornością na zużycie erozyjne.

Słowa kluczowe: natryskiwanie łukowe, powłoki natryskiwane łukowo, odporność na zużycie erozyjne

Abstract

The article presents the results of the study on erosion resistance of arc sprayed coatings made of selected alloys such as Fe-Cr-Ti-Si-Mn, Fe-Cr-B-Si-Mn, Ni-Cr-Mo-Fe-Nb, Ni-WC-Cr-B-C, and also nano alloy based on the iron matrix, strengthened by precipitations of boron carbide Fe-Si-Mn-Cr-Mo-Nb-W-B, on plates made of unalloyed steel ASTM A516, Grade 55 designed for for operation at elevated temperature. The latest generation of welding device Eutronic Arc Spray 4 for arc spraying was applied in the investigations, which ensure high stability of the process. Cored metallic wires such as EuTronic Arc 502, EuTronic Arc 547, EuTronic Arc 595, EuTronic Arc 599 i EnDotec DO*390N with the diameter of 1,6 mm were used as the additional material. The coating produced by arc spraying were approx. 0,8 mm thick and had different hardness as well as different erosion wear resistance.

Keywords: Arc spray process, Arc spray coatings, Erosion wear resistance

Wstęp

W ostatnich latach metalizacja natryskowa uległa znacznej popularyzacji i dynamicznemu rozwojowi, dzięki zastosowaniu coraz bardziej zaawansowanych technicznie źródeł ciepła oraz nowych niestopowanych dotąd materiałów powłokowych [1÷2]. Powłoki uzyskane w procesie natryskiwania cieplnego często są ekonomicznie uzasadnionym rozwiązaniem wielu problemów występujących we współczesnym przemyśle [3÷5]. Poprzez ograniczenie zużycia danego elementu zmniejsza się zarówno koszt jego użytkowania w jednostce czasu, podobnie jak intensywność uszkodzeń. Dodatkowo zwiększenie trwałości zmniejsza zawodność urządzenia w jego prawidłowym działaniu. Współcześnie, metodami natryskiwania cieplnego możliwe jest wykonanie wysokiej jakości powłok nanostrukturalnych np. na częściach silników samochodowych wykonanych ze stopów glinu, na stopach miedzi przeznaczonych na śruby napędowe jednostek pływających, powłok o dużej twardości, biokompatybilności, odporności na ścieranie, kawitację, poślizg, korozję, czy też powłok o określonych

parametrach termicznych (tzw. Thermal Barrier Coatings) lub gradientowej zmianie własności. Zużywanie się mechanizmów i części maszyn można skutecznie ograniczać ale nie da się go zupełnie wyeliminować. Istotnym procesem zużycia jest erozja, czyli zjawisko niszczenia powierzchni materiałów w wyniku wielokrotnych uderzeń strugi cieczy, gazu lub wyładowań elektrycznych. Zużyciu erozyjnemu ulega 8% elementów maszyn, a zużyciu spowodowanemu jednoczesnym oddziaływaniem ścierania, erozji i kawitacji aż 14% [6]. Erozja jest bardzo niekorzystnym zjawiskiem ponieważ wywołuje degradację powierzchni materiałów w sposób trudny do przewidzenia na etapie projektowania. Zużycie erozyjne występuje w przypadku, gdy element maszyny jest ścierany przez strumień cząstek mineralnych, posiadających określoną energię kinetyczną. W zależności od rodzaju cząsteczek wywołujących erozję można wyróżnić: zużycie erozyjne w strumieniu cząstek ciał stałych, zużycie erozyjne w strumieniu cieczy zawierających cząstki ciała stałego (zużycie hydrościerne) oraz zużycie erozyjne

Dr inż. Artur Czupryński, dr inż. Aleksander Lisiecki – Politechnika Śląska, Katedra Spawalnictwa, dr inż. Agnieszka Kurc-Lisiecka – Wyższa Szkoła Biznesu w Dąbrowie Górniczej, Katedra Transportu Szybnego.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: artur.czuprynski@polsl.pl

w strumieniu cieczy (zużycie hydroerozyjne) [7]. Erozja jest zjawiskiem które bardzo często występuje w transporcie pneumatycznym i w silnikach samolotowych, a wspólne działanie erozji oraz kawitacji, można zauważyć w przypadku turbin wodnych, rurociągów oraz na powierzchni silnikowych tulei cylindrowych.

Głównymi skutkami erozji są straty ekonomiczne, które wynikają z konieczności wymiany i regeneracji urządzenia. W przemyśle lotniczym zużycie erozyjne może spowodować bezpośrednie zagrożenie dla życia pasażerów. Erozja materiałów powoduje zmianę geometrii elementów, co skutkuje skróceniem ich trwałość. Jednym ze sposobów zapobiegania zużycia w wyniku działania erozji jest nanoszenie powłok o odpowiedniej odporności erozyjnej.

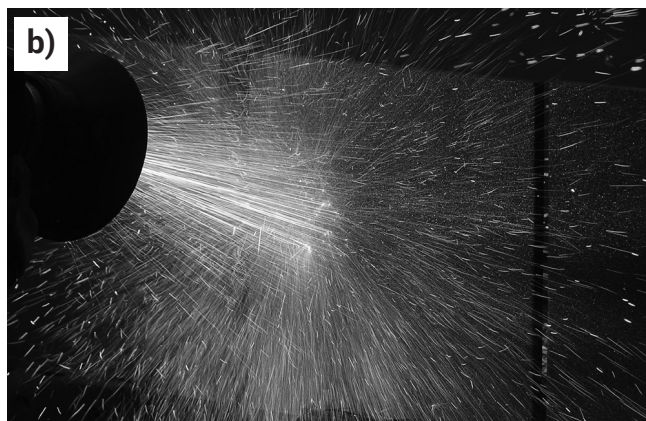
Cel i przebieg badań

Celem przeprowadzonych badań było zbadanie i porównanie odporności erozyjnej powłok natryskiwanych łukowo, drutami proszkowymi metalicznymi EuTronic Arc 502, EuTronic Arc 547, EuTronic Arc 595, EuTronic Arc 599 i EnDOTec DO*390N o średnicy 1,6 mm, tablica I, na płyty wykonane ze stali niestopowej ASTM A516, Grade 55 przeznaczony do pracy w podwyższonej temperaturze, tablica II. W oparciu o PN-EN ISO 14923:2005 [8] oraz wstępnie ustalone optymalne parametry procesu, dla każdego ze stosowanych materiałów dodatkowych, przeprowadzono próby natryskiwania łukowego powłok o grubości ok. 0,8 mm. Próby wykonano w pozycji naściennej na stanowisku produkcyjnym wyposażonym w urządzenie do natryskiwania łukowego EuTronic Arc Spray 4 oraz ręczny pistolet do natryskiwania Gun 4, rysunek 1. Płyty stalowe o wymiarach 200x200x10 mm bezpośrednio przed procesem natryskiwania poddano śrutowaniu i wstępnie podgrzano palnikiem gazowym do temperatury około 40 °C.

a)



b)



Rys. 1. Urządzenie do natryskiwania łukowego EuTronic Arc Spray 4 wyposażone w ręczny pistolet Gun 4 oraz przebieg procesu natryskiwania płyt próbnych

Fig. 1. The device for arc spraying EuTronic Arc Spray 4 equipped with handheld torch Gun 4 and a view of the process of arc spraying of test plates

Tablica I. Oznaczenie, skład chemiczny, twardość, gęstość i parametry natryskiwania łukowego próbek do badań odporności na zużycie erozyjne
Table I. Designation, chemical composition, hardness, density and parameters of arc spraying of the samples for erosion wear tests

Oznaczenie spoiwa	Skład chemiczny oraz zmierzona twardość i gęstość powłoki	Parametry natryskiwania		
		Natężenie prądu, A	Napięcie łuku, V	Odległość pistoletu od natryskiwanej blachy, mm
EuTronic Arc 502	Fe - 15,0±20,0%Cr - 2,5±3,5%Ti -1,0±1,5%Si - <0,5±1,5%Mn Twardość powłoki: 63 HRC Gęstość powłoki: 6,50 g/cm ³	200	35,0	180
EuTronic Arc 547	62,5%Ni - 22%Cr - 10%Mo - 2%Fe - 3,5%(Nb+Ti) Twardość powłoki: 92 HRB Gęstość powłoki: 7,20 g/cm ³	200	30,0	180
EuTronic Arc 595	Fe - 25,0±29,0%Cr - 3,0±4,0%B - 1,0±2,0%Si - 1,0±2,0%Mn Twardość powłoki: 60 HRC Gęstość powłoki: 6,70 g/cm ³	200	33,0	180
EuTronic Arc 599	Ni - WC - Cr - B - C (szczegółowy skład chemiczny zastrzeżony przez producenta) Twardość osnowy: 550 HV (52HRC) Twardość WC: 2400 HV Gęstość powłoki: 8,85 g/cm ³	200	30,0	180
EnDOTec DO*390N	Fe - <5%C - <2,0%Si - <5,0%Mn -- <20,0%Cr - <10,0%Mo - <10,0%Nb - <10,0%W - <5,0%B Twardość powłoki: 69 HRC Gęstość powłoki: 6,50 g/cm ³	160	30,0	180

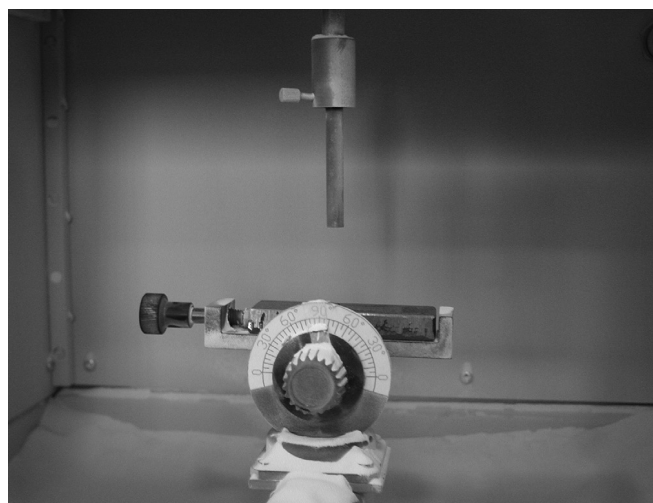
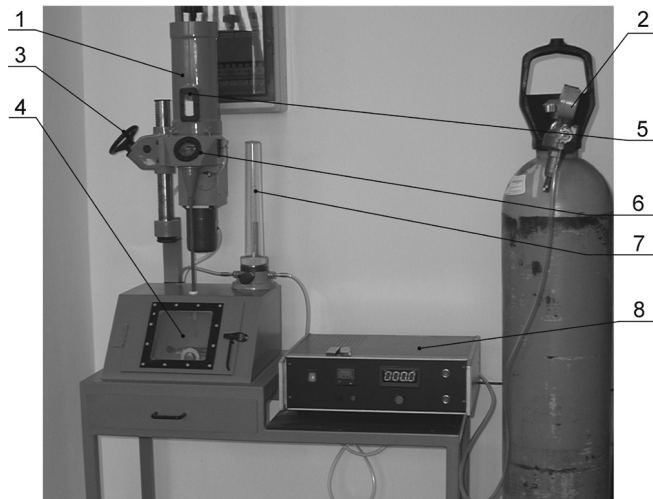
Uwaga: Druty proszkowe metaliczne o średnicy 1,6 mm. Temperatura podgrzewania wstępnego blach 40 °C. Ciśnienie powietrza atomizującego 5,5 bar.

Tablica II. Skład chemiczny blachy natryskiwanej łukowo drutami proszkowymi metalicznymi i blachy HARDOX 400 – materiału odniesienia w badaniach odporności na zużycie erozyjne

Table II. The chemical composition of steel plate substrate which was arc sprayed by the cored metallic wires and composition of the HARDOX 400 steel – reference material used comparison of erosion wear tests

Oznaczenie blach	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	B	Mo
ASTM A516 Gr. 55	0,18	0,9	0,4	0,035	0,035	-	-	-	-
HARDOX 400	0,14	1,6	0,7	0,025	0,010	0,50	0,25	0,004	0,25

Uwaga: Grubość blachy ASTM A516, Grade 55 - 10,0 mm. Grubość blachy HARDOX 400 - 10,0 mm.



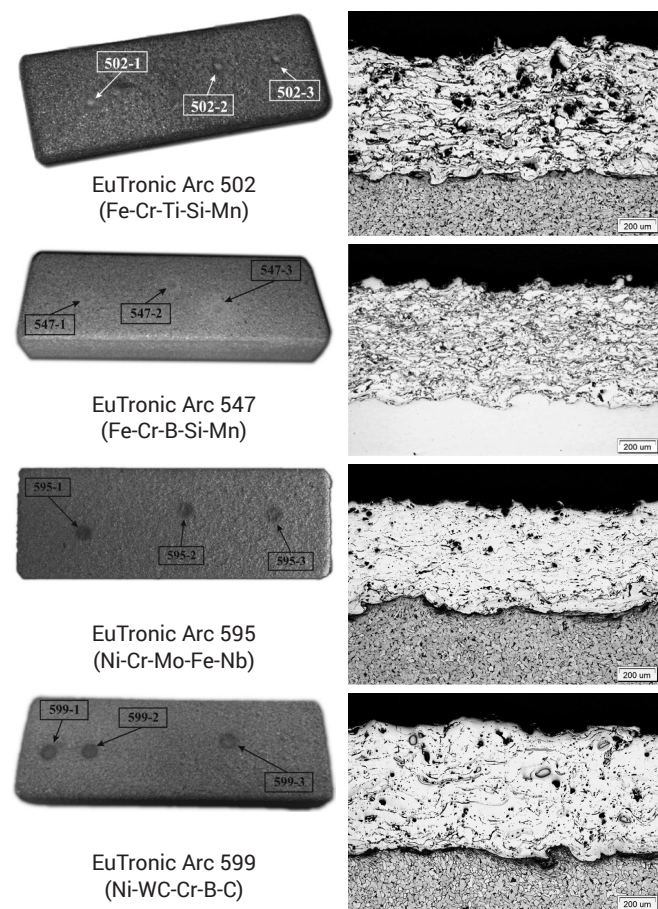
Rys. 2. Stanowisko do badań odporności na zużycie erozyjne zgodnie z normą ASTM G 76-2: a) widok ogólny: 1 - zbiornik na erodent, 2 - reduktor butli z powietrzem, 3 - pokrętko regulujące odległość dyszy od powierzchni próbki, 4 - komora pomiarowa urządzenia strumieniowo-powietrznego, 5 - okienko wizyjne do sprawdzania poziomu erodentu w zbiorniku, 6 - okienko wizyjne do sprawdzania ciągłości podawania erodentu do strumienia powietrza, 7 - rotametr, 8 - zespół sterowania i regulacji, b) widok wnętrza komory pomiarowej urządzenia strumieniowo-powietrznego

Fig. 2. The stand for erosion wear tests in accordance to ASTM G 76-2 standard: a) a general view: 1 – the container for erodent, 2 – the pressure reducer of the air cylinder, 3 – the knob for adjusting the distance between the nozzle tip and the test surface, 4 – The chamber of the erosion tester, 5 – the inspection window for checking of the erodent level, 6 – the inspection window for checking the erodent flow into the air jet, 7 – rotameter, 8 – control unit, 9 – the inner view of the chamber

Ilościowej oceny odporności na zużycie erozyjne powłok natryskiwanych łukowo wybranymi stopami typu Fe-Cr-Ti-Si-Mn (EuTronic Arc 502), Fe-Cr-B-Si-Mn (EuTronic Arc 547), Ni-Cr-Mo-Fe-Nb (EuTronic Arc 595), Ni-W-Cr-B-C (EuTronic Arc 599) oraz nano stopem na osnowie żelaza wzmocnionym wydzieleniowo węglikiem boru Fe-Si-Mn-Cr-Mo-Nb-W-B

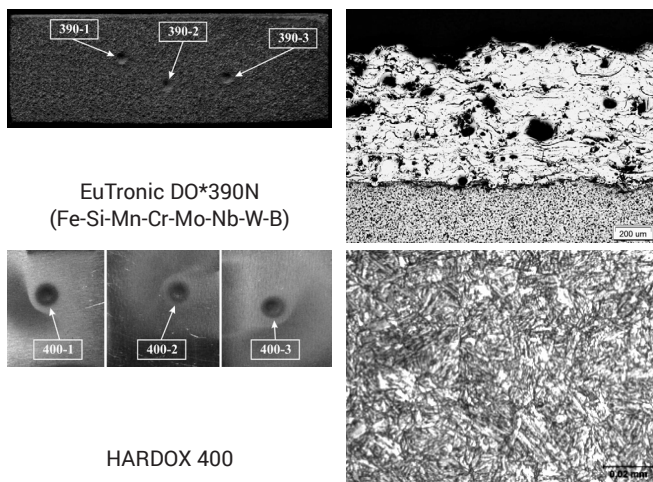
(EnDOTec DO*390N) oraz stali HARDOX 400 dokonano w oparciu o normę ASTM G 76-2 [9], rysunek 2, wykonano badania odporności erozyjnej na próbkach o wymiarach 70x25x10 mm.

Przed przystąpieniem do badań odporności na zużycie erozyjne aparaturę badawczą, zgodnie z zaleceniami normy ASTM G 76-2, poddano kalibracji ustalając natężenie przepływu strumienia czynnika erozyjnego tlenek aluminium (Al₂O₃) oraz erozyjny ubytek masy na próbce wzorcowej wykonanej ze stali AISI 1020. Badania odporności na zużycie erozyjne powłok natryskiwanych łukowo wytypowanymi drutami proszkowymi metalicznymi oraz stali HARDOX 400 przeprowadzono dla kąta padania czynnika erozyjnego względem powierzchni próbki wynoszącego 90°, tablicy III. Weryfikacji grubości oraz oceny porowatości wykonanych powłok dokonano na podstawie badań mikroskopowych zglądów metalograficznych trawionych w nitalu, rysunek 3 i 4.

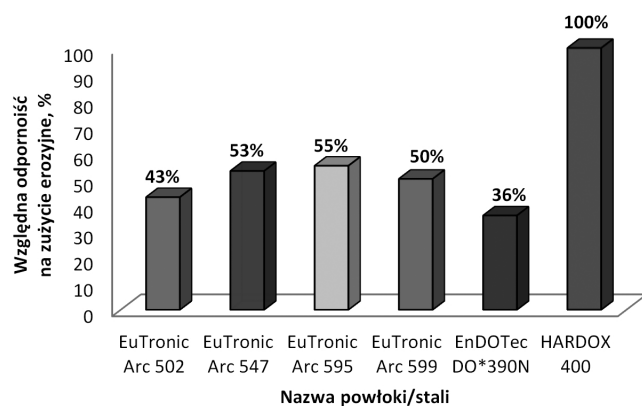


Rys. 3. Widok próbek po badaniach mikroskopowych oraz badaniach odporności erozyjnej powłok natryskiwanych łukowo wytypowanymi drutami proszkowymi metalicznymi oraz stali HARDOX 400 przeprowadzonych dla kąta padania erodentu wynoszącego 90°

Fig. 3. A view of samples after microscope observations and erosion wear test of arc sprayed coatings by selected cored metallic wires and the HARDOX 400 steel conducted at the erodent incident angle of 90°



Rys. 4. Widok próbek po badaniach mikroskopowych oraz badaniach odporności erozyjnej powłok natrykiwanych łukowo wytypowanymi drutami proszkowymi metalicznymi oraz stali HARDOX 400 przeprowadzonych dla kąta padania erodentu wynoszącego 90°
Fig. 4. A view of samples after microscope observations and erosion wear test of arc sprayed coatings by selected cored metallic wires and the HARDOX 400 steel conducted at the erodent incident angle of 90°



Rys. 5. Porównanie odporności erozyjnej powłok natrykiwanych łukowo wytypowanymi drutami proszkowymi metalicznymi oraz stali HARDOX 400 przeprowadzonej dla kąta padania erodentu wynoszącego 90°
Fig. 5. The comparison of erosion wear resistance of arc sprayed coatings by selected cored metallic wires and the HARDOX 400 steel conducted at the erodent incident angle of 90°

Tablica III. Wyniki badań odporności na zużycie erozyjne powłok natrykiwanych łukowo wytypowanymi drutami proszkowymi metalicznymi w odniesieniu do odporności na zużycie erozyjne stali HARDOX 400 przeprowadzonych zgodnie z normą ASTM G 76-2

Table III. The results of erosion wear tests of arc sprayed coatings by selected cored metallic wires compared to the erosion resistance of HARDOX 400 steel, conducted in accordance to ASTM G 76-2 standard

Oznaczenie próbki	Numer próbki	Ubytek masowy, g	Szybkość erozji, g/min	Ubytek objętościowy, mm ³	Odporność na zużycie erozyjne, 0,001mm ³ /g wg ASTM G76-2	Średnia odporność zużycie erozyjne, 0,001mm ³ /g	Względna odporność erozyjna*
EuTronic Arc 502	502-1	0,0123	0,00123	1,89231	93,44729	94,00	0,43
	502-2	0,0125	0,00125	1,92308	94,96676		
	502-3	0,0123	0,00123	1,89231	93,44729		
EuTronic Arc 547	547-1	0,0109	0,00109	1,51389	74,75995	77,05	0,53
	547-2	0,0117	0,00117	1,62500	80,24691		
	547-3	0,0111	0,00111	1,54167	76,13169		
EuTronic Arc 595	595-1	0,0097	0,00097	1,44776	71,49438	74,69	0,55
	595-2	0,0105	0,00105	1,56716	77,39082		
	595-3	0,0102	0,00102	1,52239	75,17966		
EuTronic Arc 599	599-1	0,0145	0,00145	1,63842	80,90953	81,10	0,50
	599-2	0,0147	0,00147	1,66102	82,02553		
	599-3	0,0144	0,00144	1,62712	80,35154		
EnDOTec DO*390N	390-1	0,0148	0,00148	2,27692	112,4406	111,93	0,36
	390-2	0,0147	0,00147	2,26154	111,6809		
	390-3	0,0145	0,00147	2,26154	111,6809		
HARDOX 400	400-1	0,0065	0,00065	0,82592	40,78623	40,79	1,0
	400-2	0,0066	0,00066	0,83863	41,41371		
	400-3	0,0064	0,00064	0,81321	40,15875		

Uwaga: Szybkość erozji, [g/min] = ubytek masowy próbki, [g] / czas ekspozycji, [min]; Ubytek objętościowy [mm³] = ubytek masowy próbki, [g] / gęstość powłoki [g/mm³]; Odporność na zużycie erozyjne, 0,001mm³/g = ubytek objętościowy próbki, [mm³] / całkowita masa erodentu użytego w próbce, [g]. Parametry próby erozyjnej: prędkość erodentu - 70 2 m/s, temperatura 20 °C, erodent - Al₂O₃, rodzaj gazu transportującego - sprężone powietrze, nominalny wymiar cząstek erodentu - 45÷70 μm, ilość podawanego erodentu - 2,0 0,5 g/min, czas próby - 10 min, odległość pomiędzy dyszą a próbką - 10 mm, gęstość powłoki natrykiwanej przyjęto z tabl. 1, gęstość stali HARDOX 400 - 7,87 g/cm³, masa erodentu użytego w próbce - 20,25 g. * - wynik odniesiono do próbek wykonanych z płyty stalowej HARDOX 400

Wnioski

Natryskiwanie łukowe, drutami proszkowymi z rdzeniem metalicznym gatunku EuTronic Arc 502 (Fe-Cr-Ti-Si-Mn), EuTronic Arc 547 (Fe-Cr-B-Si-Mn), EuTronic Arc 595 (Ni-Cr-Mo-Fe-Nb), EuTronic Arc 599 (Ni-WC-Cr-B-C) oraz EnDOTec DO*390N (Fe-Si-Mn-Cr-Mo-Nb-W-B) o średnicy 1,6 mm, stali niestopowej ASTM A516, Grade 55, zapewnia wykonanie wysokiej jakości powłok o zróżnicowanej gęstości, tablica I. Największą gęstość 8,85 g/cm³ odnotowano dla powłoki wykonanej spoiwem EuTronic Arc 599, a najmniejszą gęstość 6,50 g/cm³ zmierzono dla powłok natryskiwanych drutami proszkowymi EuTronic Arc oraz 502EnDOTec DO*390N. Wszystkie powłoki charakteryzowały zróżnicowaną chropowatością, dużą równomiernością na całej powierzchni i w przybliżeniu jednakową grubością wynoszącą około 0,8 mm.

Badanie wizualne prowadzone na zglądach metalograficznych prostopadłych do wykonanych powłok wykazały, że największą porowatością odznaczały się powłoki natryskiwane drutami proszkowymi EuTronic Arc 502 i EnDOTec DO*390N, ilość pustek występujących w powłokach była zbliżona, jednakże wielkość pustek zaobserwowanych w powłoce EnDOTec DO*390N była znacznie większa, rysunek 3. Minimalną ilość i wielkość pustek zidentyfikowano w powłoce wykonanej spoiwem EuTronic Arc 547. Powłoka natryskiwana nano stopem na osnowie żelaza wzmocnionym wydzieleniowo węglikiem boru Fe-Si-Mn-Cr-Mo-Nb-W-B (EnDOTec DO*390N) pomimo bardzo wysokiej twardości wynoszącej na powierzchni około 69 HRC odznaczała się najniższą odpornością na zużycie erozyjne wynoszącą 36% odporności na zużycie erozyjne stali HARDOX 400. Podobnie jak powłoka natryskiwana łukowo spoiwem EuTronic Arc 502 (Fe-Cr-Ti-Si-Mn), która przy twardości powierzchni zewnętrznej wynoszącej 63 HRC wykazywała tylko nieznacznie wyższą odporność na zużycie erozyjne, tablica III, rysunek 4.

Odporność na zużycie erozyjne tej warstwy była o 7% wyższa niż odporność na zużycie erozyjne powłoki EnDOTec DO*390N. Powłoki metalizowane łukowo drutami proszkowymi EuTronic Arc 547 oraz EuTronic Arc 599 wykazywały niemal dwukrotnie niższą odporność na zużycie erozyjne niż stal HARDOX 400. Najwyższą względną odpornością na zużycie erozyjne z spośród wszystkich badanych powłok wyróżniała się powłoka wykonana spoiwem EuTronic Arc 595, która przy twardości 60 HRC osiągnęła 55% odporności na zużycie erozyjne stali HRDOX 400.

Literatura

- [1] Poole Ch. P. Jr, Ownes F. J. Introduction to Nanotechnology, Wiley, 2003, Pages 1-8.
- [2] Wilson M., Kanangara K., Smith G., Simmons M., Raguse B. Nanotechnology: Basic sciences and emerging technologies, Overseas Press, 2005.
- [3] Bobzin K., Wielage B., Drzeniek H.: Natryskiwanie ciepłe – rozwój, potencjał, rynki, Przegląd Spawalnictwa, nr 9/2009, s. 4-10.
- [4] Dorfman M.R: Thermal spray processes. Advanced Materials & Processes, vol. 160, Ohio 2002, 47-49.
- [5] Luding R., Thorpe R.: Electric Arc Spray Coatings Increase Cost And Reliability of Power Generation Systems, Advanced Materials & Processes, vol. 171, Ohio 2013, 46-48.
- [6] Adamiec P, Dziubiński J.: Wytwarzanie i właściwości warstw wierzchnich elementów maszyn transportowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2005.
- [7] Gierek A.: Zużycie Tribologiczne, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
- [8] PN-EN ISO 14923:2005 „Natryskiwanie ciepłe – Charakterystyka i badanie powłok natryskiwanych ciepłnie”.
- [9] ASTM G 76-2 „Standard Test Method for Conducting Erosion Test by Solid Particle Impingement Using Gas Jets”.