POLEROWANIE ELEKTROCHEMICZNE WYBRANYCH STALI

W artykule przedstawiono powierzchnie stali AISI 316Ti (EN 1.4571), która zawiera głównie takie pierwiastki stopowe takie jak: chrom (16-18%), molibden (2.0-3.0%), nikiel (10.0-14.0%), tytan (max 0.7), po standardowym polerowaniu elektrochemicznym przy gęstości prądu wynoszącej 50 A/dm², w temperaturze 50±5 °C, w elektrolicie składającym się z 60% kwasu fosforowego H₃PO₄ oraz 40% kwasu siarkowego H₂SO₄ z użyciem zasilacza stabilizowanego RNG-3010. Do charakterystyki otrzymanych powierzchni po obróbce elektrochemicznej użyto parametrów chropowatości 3D według normy ISO25178, takich jak: średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia (Sa=0,744 μm), średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia (Sq=0,984), maksymalna wysokość wierzchołków (Sp=2,32), maksymalna głębokość dolin (Sv=3,5), całkowita wysokość powierzchni, (St=5,88), asymetria topografii rozkładu wysokości (Ssk=-0,898), kurtoza rozkładu wysokości (Sku=2,97).

WSTĘP

Polerowanie elektrochemiczne polega na anodowym roztrawianiu powierzchni metalu lub stopu pod wpływem prądu w kąpeli, najczęściej złożonej z kwasów fosforowego oraz siarkowego o odpowiedniej przewodności i lepkości. Innymi roztworami, które można stosować do polerowania elektrochemicznego są kąpiele oparte na chlorku amonu, chlorku sodu z dodatkiem kwasu borowego oraz chlorowodorowego, lub też elektrolity oparte na chlorku choline oraz glikolu etylenowym. Gęstości prądów stosowanych do elektropolowania znajdują się w zakresie od kilku do około tysiąca amper na decymetr kwadratowy. Stale stopowe zarówno austenityczne, ferrytyczne, jak i duplex są odporne na korozję ogólną, jednakże ulegają korozji wżerowej w agresywnych ośrodkach korozyjnych zawierających chlorki [1]. Są one bardzo często używane między innymi w przemyśle spożywczym, chemicznym, browarnictwie, budownictwie, wymiennikach ciepła. Do najbardziej rozpowszechnionych w przemyśle stali stopowych należą stopowe stale chromowo niklowe AISI 304/ AISI 304L oraz z dodatkiem molibdenu AISI 316 / AISI 316L jak i tytanu, który stabilizuje strukturę w temperaturach powyżej 800°C (AISI 316Ti) [2]. Należy jednocześnie zaznaczyć, że zarówno stale [3÷4], jak i tytan i jego stopy [5÷10] są używane zamiennie w wielu przemysłowych aplikacjach. Istotnym jest fakt, że w przypadku stali stopowych stosowanie wykończających obróbek elektrochemicznych, takich jak standardowe polerowanie elektrochemiczne [10÷13], magnetoelektropolowanie [14÷26], polerowanie przy wysokiej gęstości prądów [27÷28] oraz elektropolowanie przy wysokich napięciach [29] pozwala na uzyskanie małych chropowatości powierzchni oraz zwiększenie odporności korozyjnej obrabianych powierzchni.

1. METODYKA

Do badań użyto próbek ze stopowej stali austenitycznej AISI 316Ti (EN 1.4571) wymiarach 50 × 30 × 1,5 mm, które zaprezentowano na rysunku 1. Do głównych pierwiastków stopowych wchodzących w skład tej stali należą: chrom (16-18%), molibden (2.0-3.0%), nikiel (10.0-14.0%), tytan (max 0.7%), krzem (max 0.75%), fosfor (max 0.05%), siarka (max 0.08), węgiel (max: 0.08%) oraz żelazo (reszta składu stali).

Rys. 1 Próbki ze stali AISI 316Ti przed polerowaniem (a) i po polerowaniu elektrochemicznym (b)

Polerowanie elektrochemiczne zostało przeprowadzone przy gęstości polerowania 50 A/dm² w elektrolicie składającym się z 60% kwasu fosforowego H₃PO₄ oraz 40% kwasu siarkowego H₂SO₄, z użyciem zasilacza stabilizowanego RNG-3010, celi elektrochemicznej oraz elektrody stalowej jako katody, co zaprezentowano na rysunku 2. Wszystkie próbki były obrabiane w elektrolicie o temperaturze 50±5 °C.

Pomiary chropowatości wykonano na systemie pomiarowym Talysurf CCI 6000 firmy Talor Hobson (Rys.3). Do oceny chropowatości wykonano analizy 3D i użyto następujących parametrów do opisu powierzchni według normy ISO25178: średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia (Sa), średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia (Sq), maksymalna wysokość wierzchołków (Sp), maksymalna głębokość dolin (Sv), całkowita wysokość powierzchni, (St), asymetria topografii rozkładu wysokości (Ssk), kurtoza rozkładu wysokości (Sku).

Rys. 2. Stanowisko do polerowania elektrochemicznego

Rys. 3. Stanowisko do polerowania elektrochemicznego

2. WYNIKI

Na rysunku 4 przedstawiono powierzchnię stopowej stali austenitycznej AISI 316Ti po standardowym polerowaniu elektrochemicznym przy gęstości prądu 50 A/dm^2 . Na podstawie otrzymanego wyniku odfiltrowano falistość (Rys. 5) oraz chropowatość powierzchni (Rys. 6) oraz wygenerowano obraz 3D zmierzonej powierzchni (Rys. 7). Powierzchnia po obróbce elektrochemicznej charakteryzuje się parametrami amplitudowymi kilkukrotnie mniejszymi niż podawane w literaturze, na przykład średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia (S_a) po polerowanie elektrochemicznym wynosił ponad $1,5 \mu\text{m}$, natomiast po obróbce elektrolitycznej jedynie $0,744 \mu\text{m}$. Pozostałe parametry charakteryzujące otrzymaną powierzchnię wynoszą: $S_q=0,984 \mu\text{m}$, $S_p=2,32 \mu\text{m}$, $S_v=3,5 \mu\text{m}$, $S_t=5,88 \mu\text{m}$, $S_{sk}=-0,898 \mu\text{m}$, $S_{ku}=2,97 \mu\text{m}$ (Rys. 8). Na rysunku 9 przedstawiono krzywą Abbota-Firestone, gdzie zaprezentowano zarówno zmianę nośności zbadanej powierzchni, jak i rozkładu nierówności obliczonej dla wszystkich profili 2D używanych do stworzenia modelu 3D (Rys. 7).

Rys. 4. Powierzchnia zmierzona z uzupełnionymi punktami niezmiernymi

Rys. 5. Komponenty falistości powierzchni ze stali AISI 316Ti po polerowaniu elektrochemicznym

Rys. 6. Komponenty chropowatości powierzchni ze stali AISI 316Ti po polerowaniu elektrochemicznym

Rys. 7. Obraz 3D chropowości powierzchni stali AISI 316Ti po polerowaniu elektrochemicznym

ISO 25178

Parametry amplitudowe

Sa	= 0.744 μm
Sa:	Odchylenie średnie arytmetyczne powierzchni.
Sq	= 0.894 μm
Sq:	Odchylenie średnie kwadratowe powierzchni.
Sp	= 2.32 μm
Sp:	Maksymalna wysokość wierzchołków.
Sv	= 3.56 μm
Sv:	Maksymalna głębokość dolin.
St	= 5.88 μm
St:	Całkowita wysokość powierzchni.
Ssk	= -0.898
Ssk:	Asymetria topografii rozkładu wysokości.
Sku	= 2.97
Sku:	Kurtoza topografii rozkładu wysokości.

Rys. 8. Parametry chropowości powierzchni ze stali AISI 316Ti po polerowaniu elektrochemicznym

Rys. 9. Krzywa Abbota - Firestona

PODSUMOWANIE

Badania przeprowadzone na stopowej stali AISI 316Ti (EN 1.4571), której głównymi pierwiastkami poza żelazem są chrom (16-18%), molibden (2.0-3.0%), nikiel (10.0-14.0%) i tytan (max 0.7), po standardowym polerowaniu elektrochemicznym przy gęstości prądu wynoszącej 50 A/dm² w temperaturze 50±5 °C w elektrolicie składającym się z 60% kwasu fosforowego H₃PO₄ oraz 40% kwasu siarkowego H₂SO₄ wykazały, że można otrzymać powierzchnię o bardzo małej chropowatości powierzchni. Do scharakteryzowania otrzymanej powierzchni po obróbce elektrochemicznej użyto następujące parametry 3D chropowatości: średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia (Sa=0,744 μm), średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia (Sq=0,894), maksymalna wysokość wierzchołków (Sp=2,32), maksymalna głębokość dolin (Sv=3,5), całkowita wysokość powierzchni, (St=5,88), asymetria topografii rozkładu wysokości (Ssk=-0,898), kurtza rozkładu wysokości (Sku=2,97).

PODZIEKOWANIA

Autorzy chcieliby podziękować prof. dr hab. inż. dr h.c. mult. Wojciechowi Kacalakowi, kierownikowi Katedry Inżynierii Systemów Technicznych i Informatycznych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej, za udostępnienie systemu pomiarowego chropowatości powierzchni Talysurf CCI 6000 firmy aylor Hoson oraz dr inż. Robertowi Tomkowskiemu, za pomoc w wykonaniu pomiarów chropowatości powierzchni po polerowaniu elektrochemicznym.

BIBLIOGRAFIA

1. Rokosz K., Hryniewicz T., Solecki G., Comparative corrosion studies of 2205 duplex steel after electropolishing and passivation in Ringer's solution, *World Scientific News*, 95 (2018) 167-181
2. Datasheet: Stainless Steel 1.4571 - 316Ti, *Equinox International Ltd*, (2012) 1-3
3. Hryniewicz T., On Discrepancies Between Theory and Practice of Electropolishing, *Materials Chemistry and Physics*, 15(2) (1986) 139-154
4. Hryniewicz T., Physico-chemical and technological fundamentals of electropolishing steels (Fizykochemiczne i technologiczne podstawy procesu elektropolowania stali), Monograph No. 26(1989), *Koszalin University of Technology Publishing House*, ISSN 0239-7129 (in Polish)
5. Rokosz K., Hryniewicz T., Raaen S., and Malorny W., Fabrication and characterisation of porous coatings obtained by plasma electrolytic oxidation, *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 1(1|41) (2017) 23-30
6. Hryniewicz T., Rokosz K., Valiček J., Rokicki R., Effect of magnetoelectropolishing on nanohardness and Young's modulus of titanium biomaterial, *Materials Letters*, 83 (2012) 69-72
7. Hryniewicz T., Rokicki R., and Rokosz K., Corrosion and surface characterization of titanium biomaterial after magnetoelectropolishing, *Surface and Coatings Technology*, 203(10-11) (2009) 1508-1515
8. Hryniewicz T., Rokosz K., Valiček J., and Rokicki R., Effect of magnetoelectropolishing on nanohardness and Young's modulus of titanium biomaterial, *Materials Letters*, 83 (2012) 69-72
9. Hryniewicz T., Rokosz K., Rokicki R., and Prima F., Nanoindentation and XPS studies of Titanium TNZ alloy after electrochemical polishing in a magnetic field, *Materials*, 8(1) (2015) 205-215

10. Rokosz K., Electrochemical Polishing in magnetic field (Polerowanie elektrochemiczne w polu magnetycznym), *Koszalin University of Technology Publishing House*, Monograph No. 219(2012) ISSN: 0239-7129 (in Polish)
11. Rokicki R., Hryniewicz T., Enhanced oxidation-dissolution theory of electropolishing, *Transactions of The Institute of Metal Finishing*, 90(4) (2012) 188-196
12. Simka W., Nawrat G., Chlodek J., Maciej A., Winarski A., Electropolishing and anodic passivation of Ti6Al7Nb alloy, *Przemysł Chemiczny*, 90(1) (2011) 84-90
13. Hryniewicz T., Rokosz K., and Sandim H. R. Z., SEM/EDX and XPS studies of niobium after electropolishing, *Applied Surface Science*, 263 (2012) 357-361
14. Rokosz K., Hryniewicz T., Simon F., and Rzakiewicz S., Comparative XPS analyses of passive layers composition formed on duplex 2205 SS after standard and high current-density electropolishing, *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, 23(3) (2016) 731-735
15. Rokicki R., Apparatus and method for enhancing electropolishing utilizing magnetic field. US Patent 7632390, December 15, 2009
16. Hryniewicz T., Rokicki R., Rokosz K., Magneto-electropolishing for metal surface modification, *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 85(6) (2007), 325-332
17. Rokosz K., Hryniewicz T., Raaen S., Characterization of Passive Film Formed on AISI316L Stainless Steel after Magneto-electropolishing in a Broad Range of Polarization Parameters, *Steel Research International*, 83(9) (2012) 910-918
18. Hryniewicz T., Rokicki R., and Rokosz K., Co-Cr alloy corrosion behaviour after electropolishing and 'magneto-electropolishing' treatments, *Materials Letters*, 62(17-18) (2008) 3073-3076
19. Hryniewicz T., Rokosz K., Polarization characteristics of magneto-electropolishing stainless steels, *Materials Chemistry and Physics*, 122(1) (2010) 169-174
20. Hryniewicz T., Rokosz K., Investigation of selected surface properties of AISI 316L SS after magneto-electropolishing, *Materials Chemistry and Physics*, 123(1) (2010) 47-55
21. Rokosz K., Hryniewicz T., and Raaen S., Characterization of passive film formed on AISI 316L stainless steel after magneto-electropolishing in a broad range of polarization parameters, *Steel Research International*, 83(9) (2012) 910-918; DOI: 10.1002/srin.201200046
22. Hryniewicz T., Rokosz K., Corrosion resistance of magneto-electropolished AISI 316L SS biomaterial, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 61(2) (2014) 57-64
23. Rokosz K., Hryniewicz T., XPS Analysis of nanolayers obtained on AISI 316L SS after Magneto-electropolishing, *World Scientific News*, 37 (2016) 232-248
24. Rokosz K., Hryniewicz T., Rokicki R., XPS measurements of AISI 316LVM SS biomaterial tubes after magneto-electropolishing, *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, 21(4) (2014) 799-805
25. Rokicki R., Hryniewicz T., Konarski P., Rokosz K., The alternative, novel technology for improvement of surface finish of SRF niobium cavities, *World Scientific News*, 74 (2017) 152-163
26. Hryniewicz T., Lewicka-Rataj K., Rokosz K., On the biological response of austenitic stainless steels after electrochemical -EP and MEP- polishing, *World Scientific News*, 80 (2017) 284-296
27. Rokosz K., Lahtinen J., Hryniewicz T., and Rzakiewicz S., XPS depth profiling analysis of passive surface layers formed on austenitic AISI 304L and AISI 316L SS after high-current-density electropolishing, *Surface and Coatings Technology*, 276 (2015) 516-520
28. Rokosz K., Simon F., Hryniewicz T., and Rzakiewicz S., Comparative XPS analysis of passive layers composition formed on AISI 304 L SS after standard and high-current-density electropolishing, *Surface and Interface Analysis*, 47(1) (2015) 87-92
29. Rokosz K., Hryniewicz T., Raaen S., XPS analysis of nanolayer formed on AISI 304L SS after high-voltage electropolishing (HPEO), *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, 24(2) (2017) 321-326
30. Nowak J., Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego, WKiŁ, Warszawa 2004.
31. Bąk J., Gajda D., Wpływ substancji psychoaktywnych na zachowanie kierowców, „Logistyka” 2009, nr 6.

Electrochemical polishing of selected stainless steels

The AISI 316Ti (EN 1.4571) austenitic stainless steel sample (50 × 30 × 1,5 mm) was used for the study. The main elements forming the steel are: chromium (16-18%), molybdenum (2.0-3.0%), nickel (10.0-14.0%), titanium (max 0.7%), and iron as the rest of the steel composition. The electrolytic polishing operations were performed at the current density of 50 A/dm². The main elements of the electropolishing setup were a processing cell, a DC power supply RNG-3010, the electrodes and connecting wiring. The studies were carried out in the electrolyte of initial temperature of 50±5 °C. For the studies, as the electrolyte a mixture of two acids, i.e. H₃PO₄:H₂SO₄ equal to 60%:40%, was used. For surface characterization the 3D roughness parameters (Sa=0.744 μm, Sq=0.984; Sp=2.32, Sv=3.5, St=5.88; Ssk=-0.898; Sku=2.97) regarding ISO25178 were used.

Autorzy:

mgr inż. **Marcin Kulakowski** – Katedra Inżynierii Systemów Technicznych i Informatycznych, Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, e-mail: marcinkulakowski@wp.pl

Prof. nzw dr hab. inż. **Krzysztof Rokosz** – Katedra Inżynierii Systemów Technicznych i Informatycznych, Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 1517, 75-620 Koszalin, e-mail: rokosz@tu.koszalin.pl

JEL: L64 DOI: 10.24136/atest.2018.156

Data zgłoszenia: 2018.05.24 Data akceptacji: 2018.06.15