

Marcin KUŁAKOWSKI, Krzysztof ROKOSZ

ZASTOSOWANIE STALI STOPOWYCH W ŚRODKACH TRANSPORTU

W artykule omówione zostały zagadnienia zastosowania stali stopowych w środkach transportu. Przedstawiono podstawowe informacje dotyczące produkcji stali stopowych, walcowania na gorąco, właściwości mechanicznych oraz korozyjnych. Sporządzono wykresy przedstawiające uśrednione wartości granicy plastyczności, wydłużenia względnego, twardości oraz odporności korozyjnej (PREN) dla wybranych stali stopowych.

WSTĘP

Zapotrzebowanie na stal we wszystkich gałęziach przemysłu wymusza z roku na rok zwiększenie jej produkcji. Należy zaznaczyć, że wzrost światowej produkcji stali w ciągu pięćdziesięciu lat wzrósł o około trzydzieści milionów ton, co można najtrafniej opisać trendem wykładniczym. Do najczęściej używanych stali stopowych [1-3] można zaliczyć stale austenityczne, ferrytyczne oraz duplex (ferrytyczno-austenityczne), które nadal są używane równolegle ze stopami tytanu [4] we wszystkich środkach transportu lądowego, lotniczego oraz kosmicznego. Nadal stopy metali lekkich takich jak tytan, niob, tantal, cyrkon mimo bardzo dobrej odporności mechanicznej nie mogą wyeliminować definitywnie wzrostu zapotrzebowania na stal, co jest głównie związane z właściwościami mechanicznymi [5-9]. Podstawowym gatunkiem stali używanej w transporcie (ponad 50% całkowitej światowej produkcji) jest austenityczna stal chromowo-niklowa (AISI 304/AISI 304L) oraz z dodatkiem molibdenu (Cr-Ni-Mo) znana pod nazwą handlową AISI 316/AISI316L [10-15]. Ze względu na właściwości paramagnetyczne oraz dobrą odporność korozyjną, wymienione stale mogą być stosowane do transportu żrących substancji, które muszą być na przykład mieszane magnetycznie w trakcie przewozu [16-21].



Rys. 1. Japoński chemikaliowiec ze stalowymi zbiornikami ładunkowymi zbudowanymi ze stali nierdzewnej Duplex [28]

W przypadku przewozu bardzo agresywnych substancji o kwaśnym pH stosuje się stale duplex, które łączą właściwości stali ferrytycznych i austenitycznych. Istotnym jest fakt, że powtarzalność badań korozyjnych odnośnie korozji wżerowej (potencjał inicjacji korozji wżerowej oraz potencjał repasywacji) dla stali duplex jest dużo większa niż dla stali austenitycznych. Jest to spowodowane głównie tym, że stale duplex zawierają dużą ilość chromu (20.1-25.4%), przy jednocześnie małej ilości niklu (1.4-7%) oraz molibdenu (0.3-4%). Podstawowe gatunki tej stali to między innymi LDX

2101 oraz 2304, natomiast do najlepszych można zaliczyć 2507 and 4501 [21-27].

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie możliwości zastosowania stali stopowych w środkach transportu morskiego (Rys. 1), lądowego (Rys. 2) z uwzględnieniem ich wytwarzania.



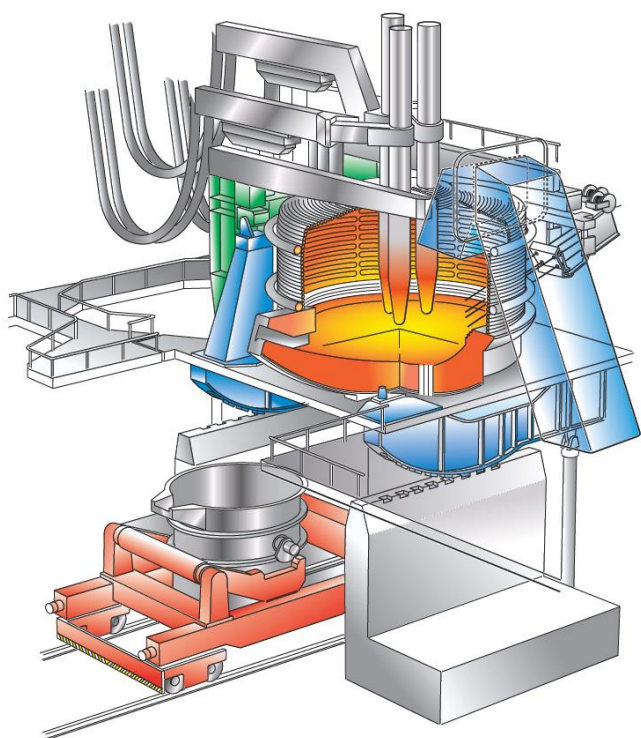
Rys. 2. Chemiczne zbiorniki transportowe ze stali nierdzewnej Duplex - Industeel UR™ 2205 [29]

1. PRODUKCJA STALI

Podstawowy surowcem do produkcji stali nierdzewnej jest odzyskany złom stalowy, głównie złom ze stali nierdzewnej. Złom stalowy jest testowany, analizowany i sortowany zgodnie z zawartością jego stopu, aby zapewnić możliwie jak najmniejszy dodatek pierwotnego materiału w celu uzyskania właściwego składu chemicznego wyprodukowanej stali nierdzewnej. Reszta to materiał pierwotny w postaci różnych pierwiastków stopowych [30].

Przetwarzanie złomu i stopów stali w zakładzie wytapiania jest pierwszym krokiem w produkcji stali nierdzewnej. Zwykle istnieją cztery główne etapy: 1) topienie surowców w elektrycznym piecu łukowym; 2) usuwanie węgla, siarki i ewentualnie także azotu

w konwertorze stalowym; 3) dostrajanie składu stali i temperatury w obróbce w kadzi; 4) odlewanie płyt. Najbardziej konwencjonalną metodą jest topienie surowców, złomu (stopowego i niestopowego) i żelazostopów w elektrycznym piecu łukowym (Rys. 3). Po załadowaniu złomu do pieca za pomocą dużych koszy, zamykana jest pokrywa, opuszcza się elektrody, zaś silne łuki elektryczne zaczynają topić złom i stopy. Podczas procesu topienia łuk osiąga temperaturę do 3500 °C, a roztopiona stal może osiągnąć temperaturę do 1800 °C. Dodatkowy zastrzyk energii chemicznej w postaci węgla, żelazokrzemu, tlenu lub mieszanin gazowych paliw przyspiesza proces topienia [30].



Rys. 3. Schemat pieca łukowego do wytopu stali [30]

Po stopieniu stali, jest ona dalej przetwarzana w konwertorze AOD (Argon Oxygen Decarburization). Celem tego etapu jest zmniejszenie zawartości węgla do docelowej ilości przez wstrzyknięcie mieszaniny tlen-argon, ale także w celu dostarczenia dodatkowych pierwiastków stopowych. Po obróbce AOD, stopiony materiał wlewa się do kadzi. Alternatywnym procesem odwęglania jest VOD (Vacuum Oxygen Decarburization), który jest szczególnie odpowiedni, gdy wymagana jest bardzo niska zawartość węgla lub azotu, na przykład w przypadku niektórych ferrytycznych stali nierdzewnych [30].

Wtórna obróbka metalurgiczna odbywa się to w stacji kadziowej, piecu kadziowym lub jako próżniowa obróbka ciekłej stali. Celem tego etapu procesu jest ostateczne dopasowanie składu chemicznego. Stal jest spokojnie mieszana, aby usunąć niepożądane wtrącenia i ujednorodnić zarówno temperaturę, jak i skład chemiczny stopionego materiału, utrzymując ściśle określony skład w ściśle określonych granicach temperatury [30].

Ciekła stalowa kadź jest transportowana do maszyny do ciągłego odlewania lub w niektórych, szczególnych przypadkach, do obszaru odlewniczego. Ciągły odlew jest procesem, w którym stopiona stal jest przekształcana w płyty o możliwej do zarządzania wielkości (Rys. 4). Z kadzi stal jest spuszczana przez dyszę do kadzi pośredniej, która jest naczyniem pośrednim zaprojektowanym do utrzymywania stałego ciężaru i pozwala na zmienne zmiany kadzi podczas procesu odlewania w procesie ciągłym. Z tej kadzi

stal przepływa przez zanurzoną dyszę wlotową do chłodzonej wodą miedzianej formy. Przepływ stali jest często sterowany automatycznie w celu utrzymania stałego poziomu stali w formie, gdy spód formy jest powoli wycofywany i podąża za zestawem wałków górnego i dolnego w kształcie łuku, które podtrzymują zestaloną powłokę pasma. Roztopiony proszek odlewniczy stosowany jest w celu zmniejszenia tarcia i zapewnienia dobrego styku formy z zestaloną powłoką. Intensywne chłodzenie strumieniem wody pasma rozpoczyna się bezpośrednio pod formą i pomiędzy rolkami podtrzymującymi, w celu zestalenia gorącego stopionego materiału, tworząc stałe pasmo stali.



Rys. 4. Schemat do ciągłego odlewania stali [30]

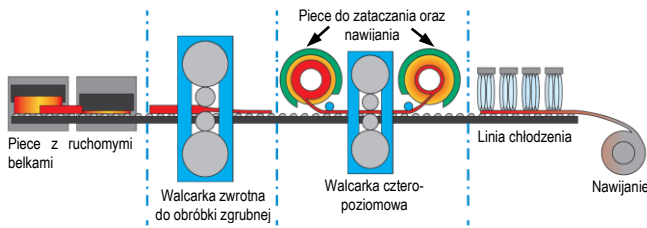
Pasma jest w sposób ciągły chłodzone i zmniejsza objętość, ponieważ jest ciągnięte na swojej łukowatej ścieżce w dół do stanowiska cięcia. Na tym etapie stal jest nadal gorąca i żarząca się, ale jest wystarczająco mocna, aby umożliwić cięcie ciężkiej nici za pomocą ruchomych lanc tlenowych w poręczne kawałki zwane płytami. Płyty służą jako surowiec poddawany dalszej obróbce. Każda płyta ma unikalny numer identyfikacyjny i jest dokładnie śledzona i zapisana w certyfikacie materiałowym. Wszystkie płyty są sprawdzane w celu zapewnienia wysokiej jakości. Płyty dla bardziej wymagających gatunków stali nierdzewnej są szlifowane w celu zapewnienia wysokiej jakości wykończenia powierzchni na produkcie końcowym [30].

2. WALCOWANIE STALI NA GORĄCO

Walcowanie na gorąco to proces obróbki metali, który zachodzi w temperaturze wyższej od temperatury rekryształizacji materiału. Materiałem wyjściowym są zazwyczaj półprodukty odlewane np. płyty. Odlana mikrostruktura ulega rozkładowi i deformacji podczas przetwarzania, a odkształcone ziarna ponownie krystalizują, co utrzymuje równomierną mikrostrukturę (struktura, w której ziarna mają w przybliżeniu takie same wymiary we wszystkich kierunkach) i zapobiega hartowaniu stali. Podczas, gdy gotowy produkt jest dobrej jakości, powierzchnia pokryta jest tlenkiem bogatym w żelazo i chrom, który tworzy się w wysokich temperaturach. Zwykle usuwa się ją w linii wyżarzania i trawienia, która przywraca gładką metaliczną powierzchnię [30].

Na rysunku 5 przedstawiono schemat linii Steckl do walcowania stali. Linia składa się z pieców z ruchomymi belkami, walcarki zwrotnej do obróbki zgrubnej, pieców do zataczania oraz nawijania, narzędzia do wykańczania i walcarki cztero poziomowej. Taśma jest

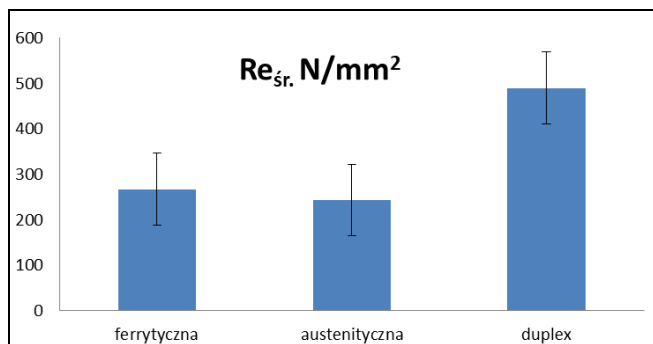
zwijana tam i z powrotem pomiędzy dwoma piecami do zwijania, a pasek ma zmniejszoną grubość w każdym przejściu między zwojami (rys. 5). Następnie materiał jest chłodzony i nawijany.



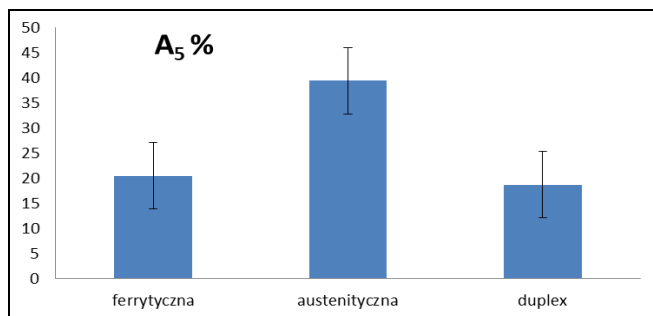
Rys. 5 Schemat linii Steckel do walcowania stali [30]

3. WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE I KOROZYJNE STALI STOPOWYCH

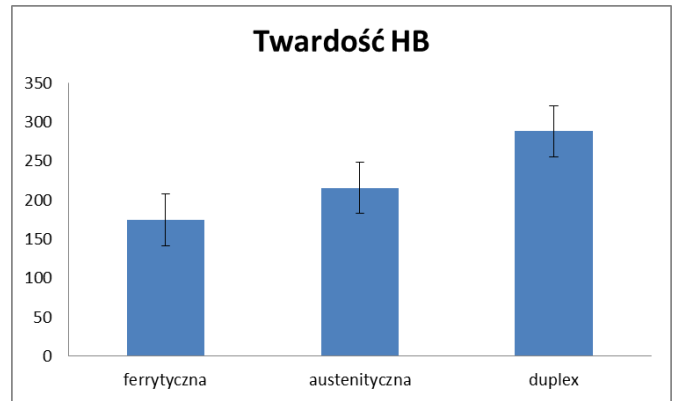
Właściwości mechaniczne stali to parametry charakteryzujące ich przydatność w gospodarce. Określają zdolność materiału do przenoszenia obciążeń i są przedmiotem znormalizowanych prób. Wielkość tych parametrów jest uzależniona od składu stopu i obróbki, a wśród nich jest: granica sprężystości (maksymalne naprężenia, po ustąpieniu których materiał wraca do swoich pierwotnych wymiarów), wytrzymałość na rozciąganie (wielkość naprężenia wywołanego w przekroju próbki przez siłę powodującą jej zerwanie), ściskanie, zginanie, ścinanie i skręcenie, plastyczność (zdolność materiału do zachowania postaci odkształconej na skutek naprężeń od obciążeń po zaprzestaniu ich działania), ciągliwość (zdolność materiału pozwalająca na zachowanie jego właściwości podczas obróbki polegającej na jego tłoczeniu, zginaniu lub prostowaniu itp.), udurowienie (odporność na obciążenia dynamiczne), twardość (zdolność przeciwstawienia się materiałowi przy próbie wciskania przedmiotów twardszych), spawalność (cecha pozwalająca na wykonanie trwałych połączeń przez spawanie), odporność na działanie środowiska (w tym: odporność na działanie podwyższonych i niskich temperatur oraz odporność na działanie czynników powodujących korozję chemiczną i atmosferyczną) [1]. Wybrane właściwości mechaniczne oraz korozyjne stali stopowych przedstawiono na rysunkach 6÷9.



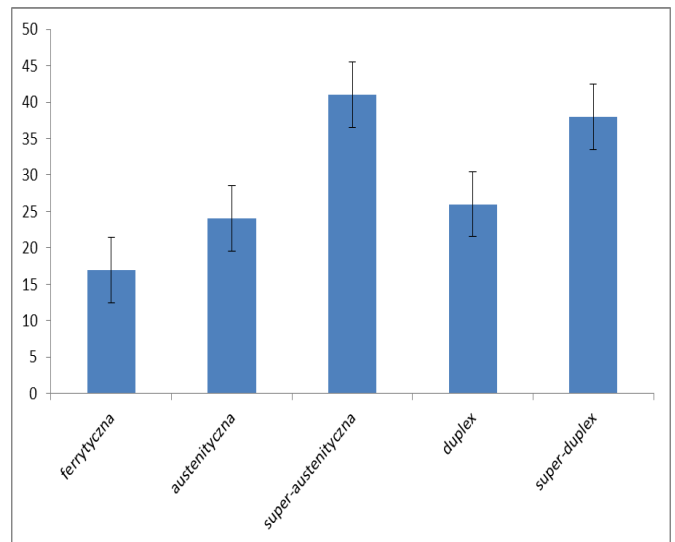
Rys. 6 Średnia granica plastyczności stali stopowych



Rys. 7 Średnie wydłużenie względne stali stopowych



Rys. 8 Średnia twardość stali stopowych



Rys. 9 Pitting resistance equivalent number (PREN) dla wybranych stali stopowych, gdzie $PREN = Cr + 3.3(Mo + 0.5W) + 16N$

Stale stopowe znajdują zastosowanie w przypadkach, gdy wymagana jest wysoka odporność korozyjna i trwałość części samochodowych. Wśród zalet stali stopowych wymienić można m.in. wysoką odporność korozyjną, możliwość kształtowania skomplikowanych kształtów, możliwość wytwarzania atrakcyjnych wizualnie wykończeń powierzchni, co wpływa na jej szerokie zastosowanie w przemyśle samochodowym. Wysoka udurowienie austenitycznych stali nierdzewnych daje możliwość ich stosowania w elementach stref zgniotu samochodów, które znajdują się już nie tylko w autach typu premium. Również nowoczesne stale duplex zainteresowały producentów pojazdów samochodowych i znalazły zastosowanie w ich produkcji.

PODSUMOWANIE

Stopy stali austenityczne, ferrytyczne i austenityczno-ferrytyczne duplex znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle samochodowym do produkcji różnych elementów pojazdów samochodowych. Są to główne rodzaje stali nierdzewnych, wykorzystywane do wytwarzania całej gamy części samochodowych [7÷10]. W pracy przedstawiono podstawowe informacje dotyczące produkcji stali stopowych, walcowania na gorąco, właściwości mechanicznych oraz korozyjnych. Sporządzono wykresy przedstawiające uśrednione wartości granicy plastyczności, wydłużenia względnego, twardości oraz odporności korozyjnej (PREN) dla wybranych stali stopowych.

BIBLIOGRAFIA

1. M. Blicharski, *Inżynieria materiałowa: stal*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2013.
2. „Zastosowanie stali nierdzewnej w produkcji samochodów osobowych”. [Online]. Dostępne na: <http://www.stalenoierdzwne.pl/porady-ekperta/zastosowanie-stali-nierdzewnej-wprodukcji-samochodow-osobowych>. [Udostępniono: 20-kwi-2017].
3. E. Partington i A. St.Mary, *Zastosowanie stali odpornych na korozję w przemyśle spożywczym, Seria Materiały i zastosowanie, zeszyt 7*. Euro Inox, 2008.
4. K. Rokosz, T. Hryniewicz, S. Raaen, W. Malorny, „Fabrication and characterisation of porous coatings obtained by Plasma Electrolytic Oxidation”, *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 1(1|4), ss. 23-30, 2017.
5. S. Hooshmand Zaferani, M. Sharifi, D. Zaarei, i M. R. Shishesaz, „Application of eco-friendly products as corrosion inhibitors for metals in acid pickling processes - A review”, *J. Environ. Chem. Eng.*, t. 1, nr 4, ss. 652–657, 2013.
6. K. Rokosz, T. Hryniewicz, i S. Raaen, „Characterization of passive film formed on AISI 316L stainless steel after magnetoelectropolishing in a broad range of polarization parameters”, *Steel Res. Int.*, t. 83, nr 9, ss. 910–918, 2012.
7. M. Kułakowski, K. Rokosz, „Zastosowanie metod elektrochemicznych do obróbki stopowych stali austenitycznych”, IV Konferencja Studentów i Młodych Pracowników Nauki, Politechnika Koszalińska, 2017
8. M. Kułakowski, K. Rokosz, „Zastosowania austenityczno-ferrytycznej stali duplex w przemyśle”, IV Konferencja Studentów i Młodych Pracowników Nauki, Politechnika Koszalińska, 2017
9. M. Kułakowski, K. Rokosz, „Stopowe stale austenityczne, ferrytyczne i duplex używane w transporcie”, *Autobusy 7-8/2017*
10. M. Kułakowski, K. Rokosz, „Metody elektrochemiczne obróbki stali używanych w transporcie”, *Autobusy 7-8/2017*
11. K. Rokosz, „SEM/EDX, XPS, corrosion and surface roughness characterization of AISI 316L SS after electrochemical treatment in concentrated HNO₃”, *Teh. Vjesn. - Tech. Gaz.*, t. 22, nr 1, ss. 125–131, 2015.
12. K. Rokosz, F. Simon, T. Hryniewicz, i S. Rządkiwicz, „Comparative XPS analysis of passive layers composition formed on AISI 304 L SS after standard and high-current density electropolishing”, *Surf. Interface Anal.*, t. 47, nr 1, ss. 87–92, 2015.
13. K. Rokosz, J. Lahtinen, T. Hryniewicz, i S. Rządkiwicz, „XPS depth profiling analysis of passive surface layers formed on austenitic AISI 304L and AISI 316L SS after high-current-density electropolishing”, *Surf. Coatings Technol.*, t. 276, ss. 516–520, 2015.
14. K. Rokosz, T. Hryniewicz, i S. Rządkiwicz, „XPS study of surface layer formed on AISI 316L after High-Current Density Electropolishing”, *Solid State Phenom.*, t. 227, ss. 155–158, 2015.
15. K. Rokosz, „High-current-density electropolishing (HDEP) of AISI 316L (EN 1.4404) stainless steel”, *Teh. Vjesn. - Tech. Gaz.*, t. 22, nr 2, ss. 415–424, 2015.
16. T. Hryniewicz, P. Konarski, K. Rokosz, i R. Rokicki, „SIMS analysis of hydrogen content in near surface layers of AISI 316L SS after electrolytic polishing under different conditions”, *Surf. Coatings Technol.*, t. 205, nr 17–18, ss. 4228–4236, 2011.
17. K. Rokosz i T. Hryniewicz, „XPS measurements of LDX 2101 duplex steel surface after magnetoelectropolishing”, *Int. J. Mater. Res.*, t. 104, nr 12, ss. 1223–1232, 2013.
18. K. Rokosz i T. Hryniewicz, „XPS measurements of passive film formed on AISI 316L SS after electropolishing in a magnetic field (MEP)”, *Adv. Mater. Sci.*, t. 12, nr 4, ss. 19–21, 2013.
19. T. Hryniewicz, R. Rokicki, i K. Rokosz, „Surface characterization of AISI 316L biomaterials obtained by electropolishing in a magnetic field”, *Surf. Coatings Technol.*, t. 202, nr 9, ss. 1668–1673, 2008.
20. T. Hryniewicz i K. Rokosz, „Analysis of XPS results of AISI 316L SS electropolished and magnetoelectropolished at varying conditions”, *Surf. Coatings Technol.*, t. 204, nr 16–17, ss. 2583–2592, 2010.
21. T. Hryniewicz i K. Rokosz, „Corrosion resistance of magnetoelectropolished AISI 316L SS biomaterial”, *Anti-Corrosion Methods Mater.*, t. 61, nr 2, ss. 57–64, 2014.
22. T. Hryniewicz, K. Rokosz, i R. Rokicki, „Magnetic Fields for Electropolishing Improvement: Materials and Systems”, t. 4, nr November 2015, ss. 98–108, 2014.
23. T. Hryniewicz, K. Rokosz, i M. Filippi, „Biomaterial studies on AISI 316L stainless steel after magnetoelectropolishing”, *Materials (Basel)*, t. 2, nr 1, ss. 129–145, 2009.
24. K. Rokosz i T. Hryniewicz, „Pitting Corrosion Resistance of AISI 316L Stainless Steel in Ringer's Solution after Magnetoelectrochemical Polishing”, *Corros. Sci.*, t. 66, nr 3, ss. 35004-35004–11, 2010.
25. K. Rokosz, T. Hryniewicz, i S. Raaen, „Cr/Fe ratio by XPS spectra of magnetoelectropolished ANSI 316L SS fitted by Gaussian-Lorentzian shape lines”, t. 3651, nr 1, ss. 533–538, 1848.
26. K. Rokosz, T. Hryniewicz, i R. Rokicki, „XPS measurements of AISI 316LVM SS biomaterial tubes after magnetoelectropolishing”, *Teh. Vjesn.*, t. 21, nr 4, ss. 799–805, 2014.
27. T. Hryniewicz i K. Rokosz, „Investigation of selected surface properties of AISI 316L SS after magnetoelectropolishing”, *Mater. Chem. Phys.*, t. 123, nr 1, ss. 47–55, 2010.
28. <http://gcaptain.com/chemical-tanker-first-use-new-duplex-stainless-steel-cargo-tanks/>
29. <http://industeel.arcelormittal.com/news/industeel-ur2205-duplex-stainless-steel-chosen-for-chemical-transportation-tanks>
30. <http://www.oxide.co.il/pdf/Outokumpu-high-performance-austenitic-stainless-steel-data-sheet.pdf>

Using of stainless steels in transport

The article discusses transport applications of most popular stainless steels. The basic information about the production of alloy steels, hot rolling, mechanical and corrosion properties in that paper, are presented. In addition, the plots of yield strength, relative elongation, hardness and corrosion resistance (PREN) for selected stainless steels were shown.

Autorzy:

mgr inż. **Marcin Kułakowski** – 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: rokoz@tu.koszalin.pl

JEL: L64 DOI: 10.24136/atest.2018.128

Data zgłoszenia: 2018.05.23 Data akceptacji: 2018.06.15