



## **Własności stali ferrytyczno – austenitycznej (duplex) oraz jej zastosowanie**

A. Guwer<sup>a</sup>, M. Bonek<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Studentka Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Studenckie Koło Naukowe Laserowej Obróbki Powierzchniowej  
email: alex7\_g7@wp.pl

<sup>b</sup> Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie  
email: mirosław.bonek@polsl.pl

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia zagadnienia związane z dwufazowymi stalami ferrytyczno – austenitycznymi. Opisano podstawowe własności mechaniczne, fizyczne i korozyjne gatunków duplex. Scharakteryzowano również najnowszy gatunek S32707 (oznaczenie UNS) na tle wcześniej opracowanych, skupiając się na ich najważniejszej własności – wysokiej odporności korozyjnej. Przedstawiono główne obszary zastosowania stali duplex oraz konkretne przykłady wykorzystania w podanych gałęziach przemysłu.

**Abstract:** This article presents the issues associated with the dual phase of austenitic-ferritic steel. The basic mechanical, physical and corrosive properties of grades of duplex were described. The newest grade S32707 (designation UNS) on the background earlier worked out was characterized, concentrating on their most important property – the high corrosive resistance. The main areas of the use of duplex steel and the specific examples of utilization in the appointed branches of the industry were introduced.

**Słowa kluczowe:** stale, stal duplex, własności stali ferrytyczno – austenitycznej, zastosowanie

### **1. WSTĘP**

Stale odporne na korozję, to stale zawierające co najmniej 10,5% chromu i maksymalnie 1,2% węgla [9]. Rozwój tego rodzaju stali nastąpił na początku XX wieku w Wielkiej Brytanii [8]. Początkowo wytwarzano stal o strukturze ferrytycznej, później martenzytycznej i austenitycznej, by w latach '30 uzyskać pierwszą stal typu duplex. W latach '60 produkowano stal duplex pierwszej generacji, '70 dzięki nowym procesom produkcji AOD oraz VOD drugiej generacji, a w '90 stal super – duplex [3,8,15]. Na przestrzeni kilku ostatnich lat firmie Sandvik udało się opracować stal hyper – duplex [15].

Rozwój stali dwufazowych odpornych na korozję będzie się nadal utrzymywał, gdyż gałęzi przemysłu, w których są stosowane ciągle przybywa. Stawiane są im coraz większe

wymagania antykorozyjne, eksploatacyjne (dążenie do wydłużenia czasu życia produktów), użytkowe związane z niezawodnością oraz ekonomiczne. Doskonalenie procesów produkcji pozwala na zaspakajanie tych oczekiwań [3].

## 2. CHARAKTYSTYKA STALI DUPLEX I JEJ WŁASNOŚCI

Stale ferrytyczno – austenityczne zawierają dwie podstawowe fazy: ferryt i austenit w ilości nie mniejszej niż 30% każdej z nich. Ze względu na tę właściwość są nazywane stalami duplex. Łączą w sobie własności stali ferrytycznych i austenitycznych. Stanowią alternatywę w stosunku do klasycznych jednofazowych stali austenitycznych i ferrytycznych. Stal duplex można różnie klasyfikować w zależności od przyjętego kryterium [7,16]:

➤ Własności użytkowe – stal nierdzewna.

Do stali nierdzewnych należą silnie zróżnicowane stopy, które zawierają minimum 10,5% Cr. Jest to warunek konieczny uzyskania pasywności metalu. Są odporne na środowiska utleniające [6].

Zgodnie z PN-EN-10027-2 stale nierdzewne posiadają następujące numery materiałowe [6]:

- 1.40xx dla gatunków zawierających  $Ni < 2,5\%$ , bez Mo, bez dodatków specjalnych,
- 1.41xx dla gatunków zawierających  $Ni < 2,5\%$  z Mo, bez dodatków specjalnych,
- 1.43xx dla gatunków zawierających  $Ni \geq 2,5\%$ , bez Mo, bez dodatków specjalnych,
- 1.44xx dla gatunków zawierających  $Ni \leq 2,5\%$  z Mo, bez dodatków specjalnych,
- 1.45xx dla gatunków z takimi dodatkami specjalnymi jak Ti, Nb, Cu.

➤ Struktura – stal austenityczno – ferrytyczna [4].

➤ Skład chemiczny – w zależności od grupy stal chromowo – niklowa lub chromowo – niklowo – molibdenowa [4, 7, 11, 16].

Norma PN-EN 10088 wyróżnia 4 grupy stali duplex [11]:

➤ Bezmolibdenowe stale 2304 (Fe-23Cr-4Ni-0,1N), w których indeks PRE jest na poziomie stali austenitycznych typu AISI 316 i wynosi ok. 25, <math>\langle \rangle / li</math> ,

➤ Stale 2205 zawierające ok. 22% Cr, 5% Ni, 3% Mo, z dodatkiem azotu – o indeksie PRE 30-36. Jest to grupa standardowych stali duplex, wykazujących odporność korozyjną wyższą od stali austenitycznych,

➤ Stale Fe-25Cr-5Ni-2,5Mo-0,17N-Cu z podwyższoną zawartością miedzi,

➤ Stale superduplex 2507 (Fe-25Cr-7Ni-3,5Mo-0,25N-W-Cu), o indeksie PRE > 40, wykazujące odporność korozyjną na poziomie stali superaustenitycznych.

Własności stali duplex przedstawiają się następująco [3, 8, 15]:

➤ Własności mechaniczne – są wyższe niż dla stali austenitycznej. Stal duplex zawdzięcza je swojej drobnoziarnistej strukturze oraz obecności roztworu międzywęzłowego azotu w austenicie, który po rozpuszczeniu powoduje uzyskanie własności mechanicznych austenitu, porównywalnych z ferrytycznymi. Własności mechaniczne stali dwufazowych obrabianych plastycznie (walcowanie, rozciąganie) wykazują dużą anizotropowość spowodowaną wydłużeniem fazy austenitycznej i ferrytycznej w kierunku działania odkształcenia. Wytrzymałość jest większa w kierunku prostym do kierunku działania odkształcenia plastycznego.

(Obróbka cieplna stali duplex: przesycanie z temperatury 1000 – 1100 °C [niekiedy 1150 °C], w powietrzu lub wodzie, w zależności od grubości ścianki. Aby zwiększyć odporność korozyjną i własności mechaniczne stal nagrzewa się do temperatury 1250 °C, szybko

ochłodzi, walcuje w temperaturze niższej od temperatury rekrytalizacji [500 – 800 °C] z gniotem ok. 30% rekrytalizacji w strefie dwufazowej [w temperaturze: 900 – 1150 °C, w czasie od 0,5h do 20h] z następnym szybkim chłodzeniem).

- Wytrzymałość na rozciąganie, granica plastyczności, przewężenie oraz wydłużenie. Stal duplex posiada dwukrotnie wyższą wytrzymałość na rozciąganie od swojej granicy plastyczności. Dla porównania dla stali austenitycznej stosunek ten wynosi 0,35.

Wartość granicy plastyczności stali duplex wynosi ok. 500 Mpa, można ją zwiększyć nawet o 1000 MPa, stosując obróbkę plastyczną na zimno.

Granica plastyczności obniża się podczas pracy w podwyższonej temperaturze. Jest to spowodowane faktem osłabienia umacniającego wpływu azotu, którego atomy stają się bardziej ruchliwe i w mniejszym stopniu blokują ruch dyslokacji.

Wzrost udziału ferrytu w strukturze stali duplex zwiększa wartość granicy plastyczności i jednocześnie zmniejsza przewężenie, wydłużenie (wydłużenie stali duplex mierzone w próbie rozciągania jest niższe w porównaniu ze stalami austenitycznymi i wynosi ok. 25 – 35%) oraz energię łamania stali (duża kruchość tej fazy). Konkretnie wartości własności omówionych powyżej dla wybranych gatunków stali duplex zawiera tablica 1.

- Twardość. Stale duplex posiadają wyższe wartości twardości niż stale austenityczne. Wyższa twardość sprawia, że stale ferrytyczno – austenityczne wykazują dobrą odporność na zużycie ściernie i erozję.

- Ciągliwość. Stale duplex wykazują dobrą ciągliwość w stanie przesyconym, jak również po spawaniu.

- Udarność. W temperaturze pokojowej jest zbliżona do stali austenitycznych, jednak z obniżeniem temperatury maleje szybciej. Temperatura przejścia w stan kruchy dla stali duplex wynosi ok. -50 °C.

Tablica 1. Właściwości mechaniczne w temperaturze pokojowej stali ferrytyczno – austenitycznych [8].

| Oznaczenie stali   | Umowna granica plastyczności 0,2% R <sub>p0,2</sub> , MPa | Wytrzymałość na rozciąganie R <sub>m</sub> , MPa | Wydłużenie A, % | Energia łamana, J | Twardość HB |
|--------------------|---|--|-----------------|-------------------|-------------|
| X2CrNiN23-4        | 400-420   | 620-830  | 20              | 100               | 260         |
| X2CrNiMoN22-5-3    | 460-480   | 650-880  | 25              | 100               | 270         |
| X2CrNiMoNCuN25-6-3 | 490-510   | 700-900  | 25              | 100               | 270         |
| X2CrNiMoN25-7-4    | 530-550   | 730-930  | 25              | 100               | 290         |
| X2CrNiMoCuWN25-7-4 | 550   | 730-930  | 25              | 100               | 290         |

➤ Wybrane własności fizyczne podane w normie EN 10088-1:2005 przedstawiają się następująco [10]:

- Gęstość – 7,8 [g/cm<sup>3</sup>].
- Moduł sprężystości: 20 °C – 200 [GPa], 100 °C – 194 [GPa], 300 °C – 180 [GPa].
- Średni współczynnik rozszerzalności cieplnej w temperaturze pomiędzy 20°C a: 100 °C – 13 [10<sup>-8</sup> \* K<sup>-1</sup>], 300 °C 14 [10<sup>-8</sup> \* K<sup>-1</sup>].
- Przewodność cieplna w temperaturze 20 °C – 15 [W/m\*K].

- Jednostkowa pojemność cieplna w temperaturze 20 °C – 500 [J/kg \* K].
- Elektryczny opór właściwy w temperaturze 20 °C – 0,8 [ $\Omega$  \* mm<sup>2</sup>/m].

➤ Odporność korozyjna [1,2,5,8].

Odporność stali duplex na korozję jest porównywalna lub nieznacznie większa od odporności korozyjnej stali austenitycznej, zawierającej identyczne ilości chromu i molibdenu.

Stal duplex jest bardziej odporna na korozję naprężeniową, w środowisku o podwyższonej temperaturze, zawierającym chlorki oraz w przypadkach, gdy element jest poddany naprężeniom rozciągającym, od stali austenitycznej. Im więcej w stali Cr, Ni, Mo, tym większa jej odporność na ten typ korozji.

Stale ferrytyczno – austenityczne cechują się wysoką odpornością na korozję międzykrystaliczną, dzięki dużej wartości współczynnika dyfuzji w ferrycie (100 razy większą niż w austenicie). Zapewnia ona ujednorodnienie zawartości chromu na granicach i wewnątrz ziaren. Stal duplex zawierająca taką samą ilość węgla co stal austenityczna, cechuje się wyższą odpornością na ten rodzaj korozji. Jeżeli zawiera poniżej 0,02% C, jest całkowicie odporna.

Odporność stali ferrytyczno – austenitycznej na korozję w kwasach nieorganicznych dwufazowych odpowiada odporności stali wysokochromowej austenitycznej.

Odporność stali duplex na korozję w kwasach redukujących zależy od jej skłonności do pasywacji, zaś w kwasach utleniających zależy od odporności warstwy wierzchniej na korozję.

Stal duplex cechuje się też dobrą odpornością na działanie kwasów organicznych.

### 3. NAJNOWSZY GATUNEK STALI TYPU DUPLEX S32707 OKREŚLANY JAKO HYPER – DUPLEX

Najlepszym typem stali super – duplex jest stal S32750, zaś gatunek hyper – duplex oznaczono jako stal S32707. Strukturę stali hyper – duplex stanowią ferryt i austenit w ilości prawie identycznej, ok. 50% każda. Współczynnik PRE dla tego gatunku stali wynosi 49, a dla Sandvik SAF 2507 – 42. Istotne jest, że dla każdej z faz (ferrytu i austenitu) jest bardzo zbliżony i jego odchylenie od średniej wynosi max. 1 PRE. Dzięki zmodyfikowaniu składu chemicznego, głównie zawartości: Cr, Ni, Mo w stosunku do gatunku super – duplex (tabela 2), wykazuje lepsze własności [14].

Tablica 2. Skład chemiczny oraz współczynnik PRE dla stali S32750 oraz S32707 [13, 14].

| Gatunek Sandvik | UNS    | C max | Cr | Ni  | Mo | N   | PRE |
|-----------------|--------|-------|----|-----|----|-----|-----|
| SAF 2507        | S32750 | 0.03  | 25 | 7   | 4  | 0.3 | 42  |
| SAF 2707 HD     | S32707 | 0.03  | 27 | 6.5 | 5  | 0.4 | 49  |

Odporność korozyjna na różnego typu korozję przedstawia się następująco [13, 14]:

➤ Korozja lokalna:

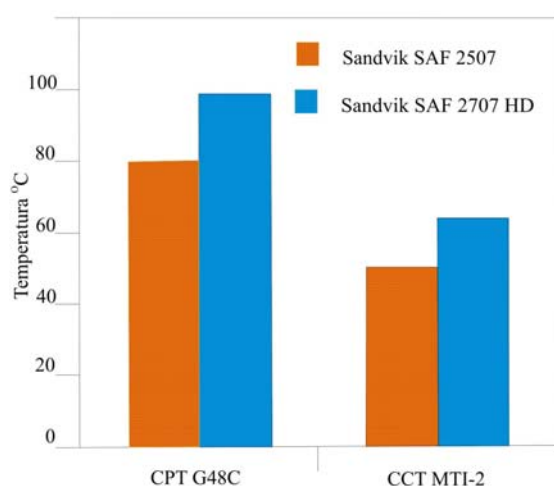
- Wzrówna. Stal Sandvik SAF 2707 wykazuje o 17,5 °C wyższą krytyczną temperaturę wzrówna niż stal Sandvik SAF 2507 i wynosi 97,5 °C. Zapewnia to bardzo wysoką odporność stali w warunkach utleniających wody zawierającej chlor (rys. 1). Również wyższą odporność korozyjną posiada w warunkach zmiennego stężenia NaCl co obrazuje rysunek 2.

- Szczelinowa. Dla stali hyper – duplex krytyczna temperatura korozji szczelinowej wynosi 72 °C, a dla S32750 50 °C (rys. 1).

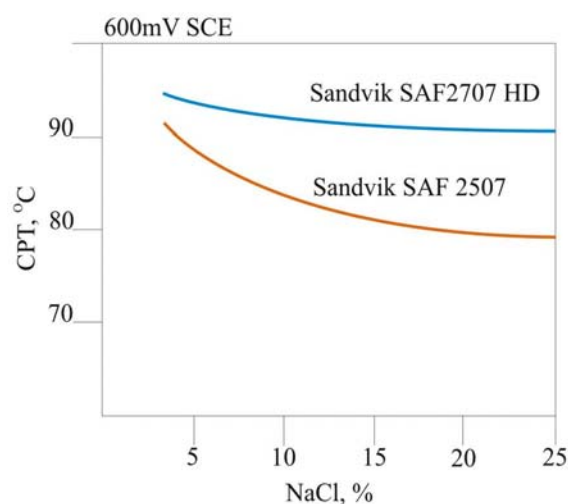
- Korozja ogólna. Gatunek S32707 w kwasach organicznych tj. kwas mrówkowy czy octowy posiada wysoką odporność korozyjną i stanowi alternatywę dla wysokostopowych stali austenitycznych oraz stopów niklowych.

- W warunkach wżenia korozja w stali hyper – duplex przebiegała wolniej w stężeniu kwasu do 50%, zaś w wyższych stężeniach lepiej sprawdził się stop N10276.

- W temperaturze 105 °C w stali hyper – duplex korozja przebiega wolniej niż w N10276 w całym zakresie stężeń.



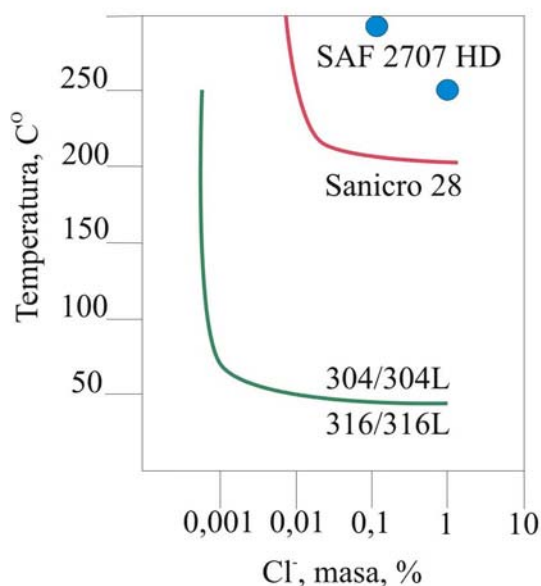
Rysunek 1. Krytyczna temperatura wżerowa uzyskana w zmodyfikowanej próbie G-48A i krytyczna temperatura korozji szczelinowej ustalona w teście MTI-2 [14].



Rysunek 2. Krytyczna temperatura wżerowa w zmiennym stężeniu kwasu NaCl (3% - 25%) [14].

- Korozja naprężeniowa. Najpoważniejszy typ korozji w przemyśle, powodujący szybkie uszkodzenia materiału. Odporne są na nią stopy niklowe (>25% Ni) oraz stale typu duplex o niższym stężeniu Ni, które wykazują tę samą lub wyższą odporność dzięki dwufazowej strukturze. Rysunek 3 przedstawia wyniki testu (6 tyg., ciśnienie 100 bar, zawartość tlenu 8ppm, płyn NaCl) na korozję naprężeniową.

- Własności mechaniczne. Gatunek Sandvik SAF 2707 HD posiada bardzo wysokie wartości własności, granica plastyczności dzięki strukturze duplex jest dwa razy wyższa niż w stalach austenitycznych przy zachowaniu wysokiej odporności na korozję wżerową. Wysoka wytrzymałość stali pozwala na redukcję grubości materiału, obniżenie masy i kosztu wytwarzanego elementu. Porównanie własności mechanicznych dwóch gatunków stali firmy Sandvik zawiera tablica 3.



Rysunek 3. Wyniki testu na korozję wżerową [14].

Tablica 3. Zestawienie wybranych własności mechanicznych SAF 2507 i SAF 2707 [13].

| Gatunek Sandvik | Granica plastyczności $R_{0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ], min | Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ] | Wydłużenie $A_5$ , % | Twardość HV |
|-----------------|---|--|----------------------|-------------|
| SAF 2707        | 700   | 920-1100   | 25                   | 330         |
| SAF 2507        | 550   | 800-1000   | 25                   | 280         |

➤ Stal hyper – duplex posiada bardzo dobrą udarność. Dolna temperatura przejścia w stan kruchy jest niższa od -50 °C, a dla pozostałych gatunków typu duplex nie przekracza tej temperatury.

#### 4. ZASTOSOWANIE STALI FERRYTYCZNO – AUSTENITYCZNEJ

Ogólne zużycie stali duplex na tle stali stopowych wynosi 1%, jednak zapotrzebowanie ciągle wzrasta [3, 8].

Główne obszary zastosowania stali duplex [3, 8]:

- Budowa konstrukcji i urządzeń eksploatowanych w wodzie morskiej, atmosferze zanieczyszczonej siarkowodorem oraz innymi substancjami chemicznie agresywnymi,
- Przemysł wydobywczy ropy i gazu (konstrukcje i urządzenia),
- Przemysł stoczniowy (statki transportujące substancje chemiczne),
- Przemysł celulozowo – papierniczy,
- Przemysł chemiczny,
- Przemysł spożywczy,
- Przemysł lotniczy,
- Przemysł kriogeniczny,
- Przemysł elektryczny
- Przemysł motoryzacyjny.

Konkretne przykłady zastosowania stali ferrytyczno – austenitycznej w różnych obszarach przemysłu przedstawiają się następująco [3, 8, 12]:

- Elementy wymienników ciepła (rury o dużej i małej średnicy do produkcji i przechowywania gazu i oleju, podgrzewacze, skraplacze, chłodnice, pompy),
- Elementy rurociągów instalacji odsalania, odsiarczania, oczyszczania,
- Elementy zbiorników ciśnieniowych (rury, instalacje do technologicznego przetwarzania i transportu różnych chemikaliów),
- Ściany ogniowe i przeciwybuchowe na platformach wiertniczych,
- Rurociągi w przemyśle przetwórczym do transportu roztworów zawierających chlorki,
- Wirniki, wentylatory, wały i walce prasownicze, które muszą mieć wysoką wytrzymałość na zmęczenie korozyjne,
- Zbiorniki i rurociągi w przemyśle okrętowym, w statkach do transportu chemikaliów,
- Instalacje pozabrzegowe,
- Części maszyn i urządzeń w przemyśle papierniczym,
- Urządzenia przemysłu wydobywczego ropy naftowej i gazu, instalacje na polach naftowych i do transportu ropy naftowej,
- Zbiorniki i instalacje w przemyśle petrochemicznym,
- Zbiorniki do przerobu produktów spożywczych (pomidorów, sosów barbeque i sojowego),
- Mosty, elementy konstrukcji.

## 5. PODSUMOWANIE

Pierwsze stale o strukturze ferrytyczno – austenitycznej uzyskano w latach '30 XX wieku. Na przestrzeni lat modyfikowano ich skład chemiczny oraz opracowywano nowe metody wytwarzania, co umożliwiło otrzymywanie coraz to nowych gatunków o lepszych własnościach. Główną zaletą tego typu materiałów jest bardzo wysoka odporność korozyjna (np. naprężeniowa, wżerowa, szczelinowa, ogólna, międzykrystaliczna) na różnego rodzaju środowiska (roztwory, temperatury). Dzięki tej własności obszarów przemysłu, w których są stosowane ciągle przybywa. Konieczne staje się więc opracowywanie coraz lepszych własności: korozyjnych, wytrzymałościowych z zachowaniem wysokiej plastyczności, udarowych, twardości, itp. To z kolei powoduje rozszerzanie się zakresu tolerancji warunków, w których mogą pracować (np. temperaturowy, stężeniowy, wytrzymałościowy). Prace polegające na opracowywaniu nowych gatunków są prowadzone na bieżąco, czego przykładem może być najnowszy gatunek duplex S32707, uzyskany dzięki modyfikacji gatunku S32705. Jego lepsze własności w stosunku do poprzedniego gatunku to głównie wyższa: granica plastyczności o 150 N/mm<sup>2</sup>, wytrzymałość na rozciąganie o 100 N/mm<sup>2</sup>, twardość o 50 HV, krytyczna temperatura: wżerowa o 17,5 °C i korozji szczelinowej o 22 °C oraz niższa temperatura przejścia w stan kruchy poniżej -50 °C.

## LITERATURA

1. Baszkiewicz J., Korozja materiałów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
2. Baszkiewicz J., Podstawy korozji materiałów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.

3. Brytan Z., Struktura i własności odpornych na korozję stali ferrytyczno – austenitycznych spiekanych z chłodzeniem konwekcyjnym, Gliwice 2006.
4. Dobrzański L.A., Metalowe materiały inżynierskie, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 2004.
5. Dobrzański L.A., Brytan Z., Odporność na korozję stali ferrytyczno-austenitycznych wytwarzanych technologią metalurgii proszków, Ochrona przed korozją, nr 6, 2005, s. 220 – 225.
6. Ferenc K., Technika spawalnicza w praktyce, Wydawnictwo Verlag Dashofer, Warszawa 2008.
7. Łabanowski J., Właściwości i spawalność dwufazowych stali odpornych na korozję typu duplex, Przegląd Spawalnictwa, R. 79, nr 10, 2007, s. 35 – 40.
8. Nowacki J., Stal duplex i jej spawalność, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 2009.
9. Norma: PN-EN ISO 3651-1:2004
10. Norma: EN 10088-1:2005
11. Norma: PN-EN 10088-1:2007
12. Strona internetowa: <http://www.outokumpu.pl/41776.epibrw>
13. Strona internetowa:  
[http://www2.sandvik.com/sandvik/0140/internet/se01261.nsf/D21FEF483449760DCA2570B30001E4ED/\\$file/Technical%20Information%201.pdf?OpenElement](http://www2.sandvik.com/sandvik/0140/internet/se01261.nsf/D21FEF483449760DCA2570B30001E4ED/$file/Technical%20Information%201.pdf?OpenElement)
14. Strona internetowa:  
[http://www.smt.sandvik.com/sandvik/0140/internet/s001664.nsf/3aa39d675f7cc278c12569b900513b28/3c85c80ff467214fc1257267005814da/\\$FILE/S-51-63-ENG%20061101.pdf](http://www.smt.sandvik.com/sandvik/0140/internet/s001664.nsf/3aa39d675f7cc278c12569b900513b28/3c85c80ff467214fc1257267005814da/$FILE/S-51-63-ENG%20061101.pdf)
15. Strona internetowa:  
[http://www.imoa.info/\\_files/stainless\\_steel/Duplex\\_Stainless\\_Steel\\_2d\\_Edition.pdf](http://www.imoa.info/_files/stainless_steel/Duplex_Stainless_Steel_2d_Edition.pdf)
16. Wysiecki M.: Nowoczesne materiały narzędziowe. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 1997.