INSTYTUT SPAWALNICTWA
Polskie Spawalnicze Centrum Doskonałości

ul. Bł. Czesława 16-18; 44-100 Gliwice
www.is.gliwice.pl

Charakterystyka budowy mikrostrukturalnej złączy spawanych ze stali API X70

Autorzy:
Marek Stanisław Węglowski*, Janusz Rykała, Jerzy Niagaj,
Stanisław Dymek**, Mateusz Kopyściański **, Adam Maciejewski***
*Instytut Spawalnictwa, **Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica,
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Kraków, *** JT S.A., Warszawa

Wstęp

Rurociągi są najbezpieczniejszym i najbardziej ekonomicznym sposobem transportu ropy i gazu na duże odległości. Rosnące zużycie energii i wzrost zapotrzebowania na nośniki energii, a w szczególności na gaz ziemny, decydują o rozwoju sieci rurociągów przesyłowych. Znaczne odległości dzielące źródła gazu ziemnego i ropy od miejsca ich zużycia wymagają budowy tranzytowych rurociągów o bardzo wysokich parametrach pracy, przy możliwie jak najmniejszych kosztach inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

Jednym z najważniejszych aspektów przy wykonywaniu rurociągów jest opracowanie właściwej technologii wykonywania złączy obwodowych, która zapewni trwałość i niezawodność konstrukcji w przewidywanym okresie eksploatacji.

Celem pracy było wykonanie złączy doczołowych sprawdzonymi i stosowanymi w praktyce metodami tj. elektrodami otulonymi i MAG oraz przeprowadzenie szczegółowych badań metalograficznych mikroskopowych.

Materiały do badań i metodyka

Złącza spawane obwodowo wykonano na rurach (914,4 18,1mm) ze stali w gatunku API X70. Skład chemiczny stali oraz własności mechaniczne przedstawiono odpowiednio w tablicach 1 i 2. Złącza spawane wykonano elektrodami otulonymi oraz metodą MAG. Informacje dotyczące zastosowanych materiałów dodatkowych przedstawiono w tablicy 3.

Zawartość pierwiastów stopowych [%]								
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
0,101	1,774	0,340	0,013	0,004	0,039	0,164	0,009	0,118
Co	Al	V	Ti	B	Nb	Zr	W	Zr
0,011	0,037	0,008	0,033	0,0003	0,051	0,0022	0,026	0,002

Tablica 1. Zestawienie zawartości składników stopowych badanej stali

Próbka				Własności mechaniczne						
Nr	Wymiar			$F_{0,5}$	F_m	$R_{0,5}$	R_m	L_u	A_5	Uwagi
	a_0- b_0 [mm]	L_0 [mm]	S_0 [mm^2]	[kN]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[%]	
4A	17,1- 25,3	120	432,6	239,6	275,3	553,9	636,4	145,7	21,4	Poprzecznie
4B	17,1- 25,2	120	430,9	243,2	273,3	564,5	634,3	144,7	20,6	do osi rury
5A	17,1- 25,0	120	427,5	258,3	279,6	604,1	654,0	147,4	22,8	Równolegle
5B	17,15- 24,9	120	427,0	259,6	279,1	607,8	653,5	146,9	22,4	do osi rury

Tablica 2. Własności mechaniczne stali API 5L X70 (L485)

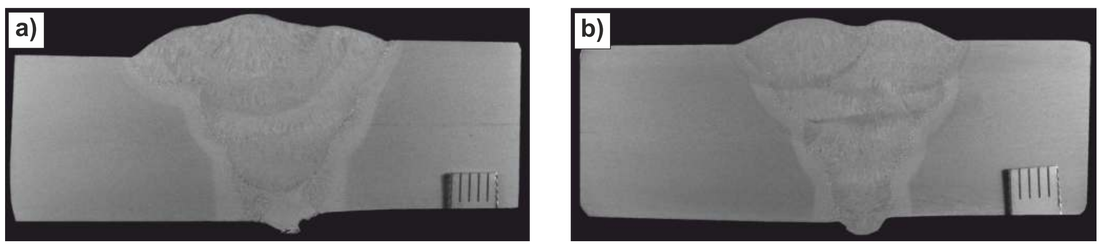
Nr	Gatunek / producent	Norma, klasyfikacja	Średnica, mm	Przeznaczenie
		Elektrody otulone		
1	Pipeliner 6P+/ Lincoln Electric	PN-EN ISO 2560:2010 E 35 3 C 25	3,2	Wszystkie pozycje włacznie ze spawaniem pionowo w dół, celulozowa elektroda do spawania rur, do spawania warstw przetopowych stali do X80 i do spawania warstw przetopowych, wypełniajacych stali X60.
3	FOX EV 85/ Böhler	PN-EN ISO 18275:2012 E 69 6 Mn2NiCrMo B 4 2 H5	4,0	Elektroda zasadowa o stopiwie wysokiej ciągliwości I odporności na pękanie do spawania drobnoziarnistych stali wysokowytrzymałych powyżej X80. Bardzo niska zawartość wodoru.
		Materiały dodatkowe do spawaniametodą MAG		
5	LMN MoNiVa / Lincoln Electric	PN-EN ISO 16834 - A G 69 4 M Mn3Ni1CrMo;	1,2	Drut pełny do spawania stali wysokowytrzymałych o R_e do 690 MPa.

Tablica 3. Informacje dotyczące zastosowanych materiałów dodatkowych

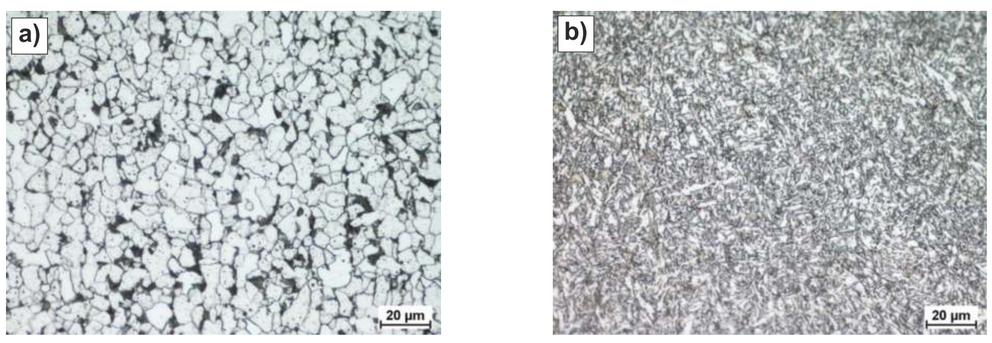
Próbki do badań metalograficznych zostały wyszlifowane na papierach ściernych o gradacjach 300, 600, 1200 oraz 2000 i wypolerowane mechanicznie w dwóch etapach na zawiesinach tlenku aluminium. Następnie próbki wytrawiono chemicznie w roztworze kwasu azotowego w alkoholu – badania mikroskopowe oraz w odczynniku Adlera – badania makroskopowe. Wstępne badania próbek wykonano na mikroskopie świetlnym (LM) (Axio Imager MAT. M1m firmy Carl Zeiss oraz ECLIPSE MA 200 firmy Nikon), a zasadnicze badania metalograficzne na elektronowym mikroskopie skaningowym (SEM) FEI Nova NanoSEM 450. Badania metalograficzne przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 17639:2013-12E.

Wyniki badań

Celem badań było określenie różnic w budowie mikrostrukturalnej złączy w zależności od technologii spawania i zastosowanego materiału dodatkowego. Na rysunku 1 przedstawiono makrostruktury złączy. W spoinie w złączu wykonanym metodą MMA przy użyciu materiałów dodatkowych w gatunku FOX EV85 - ściegi wypełniające oraz Pipeliner 6P+ - ściegi graniowe, można rozróżnić wyraźne dwa obszary różniące się znacząco mikrostrukturą (rys. 2). Obszar dolny spoiny, utworzony przez kilka ściegów graniowych miał grubość ok. 5 mm i był oddzielony od pozostałej części spoiny wyraźną granicą. Ściegi graniowe charakteryzują się typową strukturą ferrytyczną z niewielką ilością perlitu zdegenerowanego, w ściegach wypełniających dominuje natomiast struktura bainityczna z listwami ferrytu i wydzieleniami cementytu.

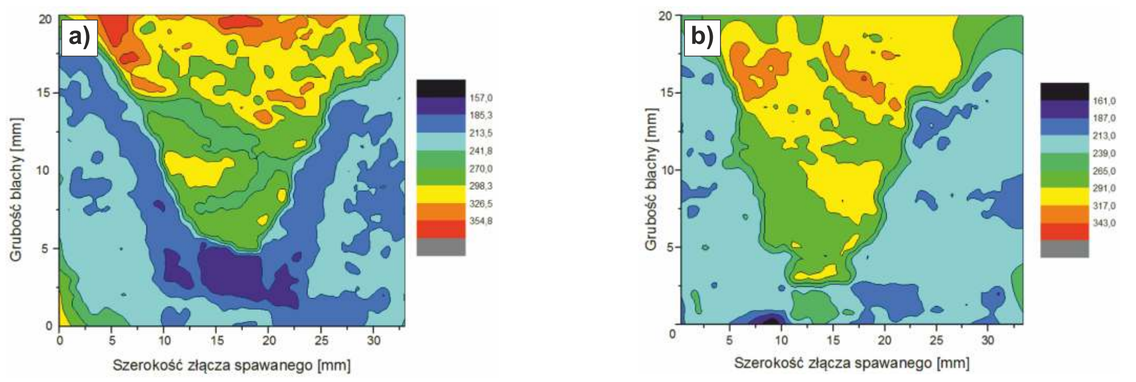


Rys. 1. Makrostruktury złączy, a) MMA FOX EV85 + Pipeliner 6P+, b) LMN MoNiVa



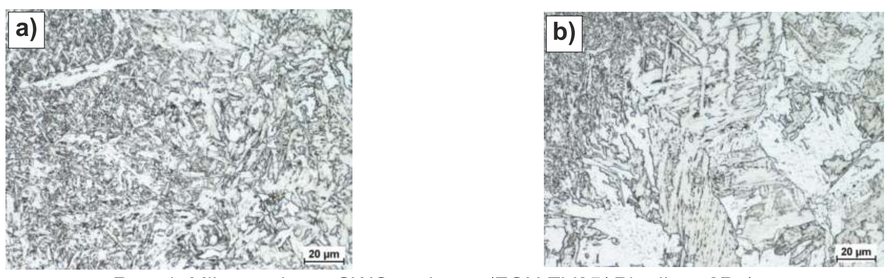
Rys. 2. Mikrostruktura spoiny w złączu spawanym metodą MMA: a) ściegi graniowe wykonane elektrodą Pipeliner 6P+, b) ściegi wypełniające wykonane elektrodą FOX EV85

Zastosowanie odmiennych materiałów dodatkowych oraz cykl cieplny spawania spowodowały również znaczne zmiany w rozkładzie twardości w obszarze spoiny i SWC (rys. 3a). Ściegi graniowe zostały wyżarzone w trakcie wykonywania ściegów wypełniających co skutkowało znaczącym spadkiem twardości.



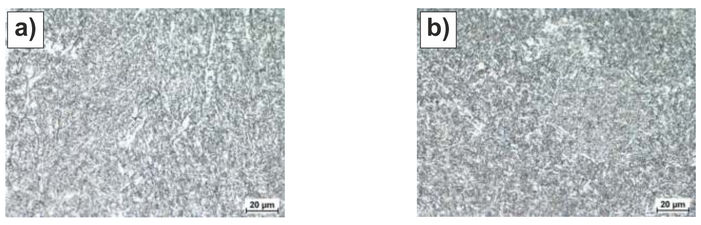
Rys. 3. Rozkład twardości HV0,5 w złączu spawanym a) MMA, b) MAG

Przeprowadzone badania wykazały, iż SWC w złączu spawanym metodą MMA nie jest jednorodna – w pobliżu linii wtopienia występuje strefa gruboziarnista, a w dalszej odległości strefa drobnoziarnista. Jest to typowa struktura obserwowana w połączeniach różnych gatunków stali konstrukcyjnych, jednak zarówno w strefie gruboziarnistej, jak i drobnoziarnistej, struktura jest mieszaniną różnych składników mikrostrukturalnych, których rodzaj zależy od historii cieplnej poszczególnych obszarów. W strukturze można wyróżnić ferryt w różnych morfologiach (poligonalny, iglasty, tzw. acicular, ferryt pierwotny – zarodkujący na granicach ziarn austenitu lub w ich wnętrzach, ferryt Widmanstättena, ferryt bainityczny), bainit (również o różnej morfologii), perlit oraz martenzyt, który zwykle występuje w formie wysp martenzytyczno-austenitycznych (M/A) (rys. 4).

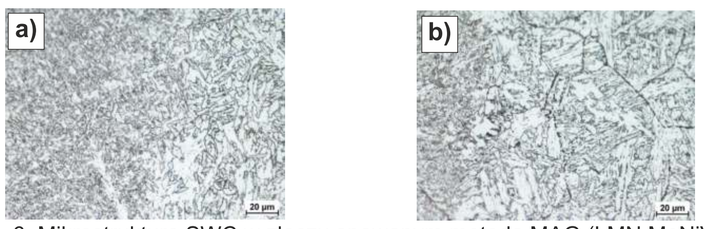


Rys. 4. Mikrostruktura SWC w złączu (FOX EV85/ Pipeliner 6P+)
a) obszar w pobliżu ściegów graniowych, b) obszar w pobliżu lica

Również w przypadku złączy wykonanych metodą MAG można wyróżnić charakterystyczne strefy o odmiennej budowie mikrostrukturalnej. Mikrostrukturę w pobliżu linii wtopienia w złączu spawanym materiałem dodatkowym w gatunku LMN MoNiVa, w skali mikroskopu świetlnego, przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

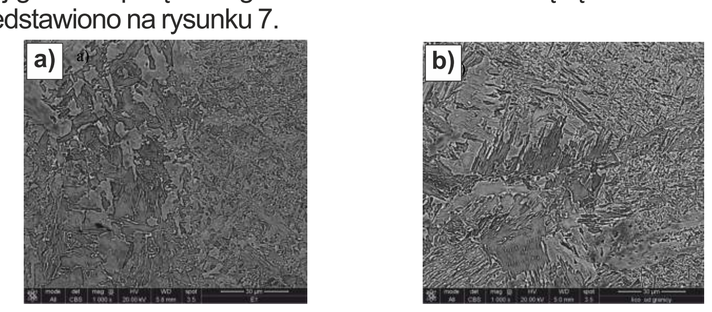


Rys. 5. Mikrostruktura spoiny w złączu spawanym metodą MAG (LMN MoNiVa), a) ściegi graniowe, b) ściegi wypełniające



Rys. 6. Mikrostruktura SWC w złączu spawanym metodą MAG (LMN MoNiVa),
a) w pobliżu ściegu graniowego, b) w pobliżu ściegów wypełniających

Mikrostruktura spoiny jest mikrostrukturą drobnego bainitu oraz można zaobserwować ferryt, który tworzy fazę ciągłą oraz ferryt Widmanstättena, którego płytki wrastają w kierunku wnętrza ziarn. Twardość spoiny wynosiła 320 HV10, co odpowiada obserwowanej mikrostrukturze. W SWC można wyróżnić obszar gruboziarnisty przylegający do spoiny, typowy dla wszystkich spoin stalowych, który w sposób ciągły przechodzi w obszar drobnoziarnisty. Mikrostruktura w pobliżu linii wtopienia jest podobna, lecz nie jednakowa, na całej grubości połączonego elementu. Mikrostrukturę tę w skali elektronowego mikroskopu skaningowego przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Mikrostruktura spoiny i SWC złącza MAG (LMN MoNiVa), a) w pobliżu grani, b) w pobliżu lica)

W przypadku złącza spawanego metodą MAG zastosowano jeden gatunek materiału dodatkowego. Odmienny cykl cieplny spawania w porównaniu do złącza spawanego elektrodami otulonymi spowodowały, iż w spoinie złącza spawanego MAG nie zaobserwowano tak znacznych zmian w rozkładzie twardości (rys. 3b).

Wnioski

- w spoinie w złączu MMA można wyróżnić dwa charakterystyczne obszary, ściegi graniowe charakteryzują się typową strukturą ferrytyczną z niewielką ilością perlitu zdegenerowanego, w ściegach wypełniających dominuje natomiast struktura bainityczna z listwami ferrytu i wydzieleniami cementytu,
- w spoinie złącza MAG można wyróżnić mikrostrukturę drobnego bainitu oraz zaobserwować ferryt, który tworzy fazę ciągłą oraz ferryt Widmanstättena, którego płytki wrastają w kierunku wnętrza ziarn,
- w obu przypadkach mikrostruktura SWC nie jest jednorodna i zależy od odległości od linii wtopienia, jednakże przeważa struktura bainityczną.

Podziękowania

Badania były prowadzone w ramach projektu międzynarodowego pt.: „Projektowanie w oparciu o odkształcenie rur spawanych spiralnie do zastosowań w budowie rurociągów, SBD-Spipe” w ramach RFCS - Funduszu Badawczego Węgla i Stali UE na podstawie kontraktu zawartego z Komisją Europejską o nr RFSR-CT-2013-00025.

Kontakt:
Marek St. Węglowski
Instytut Spawalnictwa
Zakład Badań Spawalności
i Konstrukcji Spawanych
ul. Bł. Czesława 16-18
tel. +48 32 33 58 236
fax. +48 32 23 14 652
44-100 Gliwice
Marek.Weglowski@is.gliwice.pl

58. KONFERENCJA SPAWALNICZA
TECHNOLOGIE XXI WIEKU
ExpoWELDING
18-20.10.2016; Sosnowiec