

STRUKTURA I WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE ZŁĄCZY SPAWANYCH STALI FERRYTYCZNEJ X2CrNi12 ZE STALĄ AUSTENITYCZNA X5CrNi 18-10

Krzysztof CIECHACKI*, Tadeusz SZYKOWNY*

*Zakład Inżynierii Materiałowej, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy,
ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

krzysztof.ciechacki@utp.edu.pl, tadeusz.szykowany@utp.edu.pl

Streszczenie: Podstawowym celem pracy jest powiązanie charakteru mikrostruktury różnoimiennych złączy spawanych z podstawowymi właściwościami mechanicznymi. W badaniach właściwości mechanicznych określono rozkład makro i mikrotwardości w obrębie złącza, wytrzymałość na rozciąganie, udarność oraz wykonano próbę zginania. W badaniach strukturalnych posłużono się metodą mikroskopii świetlnej i mikroskopii skaningowej SEM oraz badań dyfrakcyjnych rentgenowskich. Do badań przyjęto stal o strukturze ferrytycznej X2CrNi12 i stal o strukturze austenitycznej X5CrNi 18-10 w postaci blach o grubości 5mm. Spawanie wykonano metodą GMA przy zastosowaniu trzech różnych gatunków spoiwa: 307 (G 18 8 Mn); 309LSi (G 23 12 L Si); OK. Tubrot 14.27.

1. WPROWADZENIE

Ze względu na bardzo wysoki, ciągle rosnący koszt niklu, oraz czynników ekonomicznych uzasadnione jest spawanie stali kwasoodpornej austenitycznej ze stalą odporną na korozję o strukturze ferrytycznej. Według danych z grudnia 2009, cena stali odpornej na korozję o strukturze ferrytycznej gatunku X2CrNi12 wynosi 251€ za tonę natomiast stali o strukturze austenitycznej typu X5CrNi 18-8 wynosi 1022€ za tonę. Cena podstawowego składnika stali austenitycznych – niklu, w styczniu 2010 roku kształtowała się na poziomie 22 000 \$ i według prognoz cena ta do końca półrocza wzrośnie o 26-30% (<http://www.stalnierdzenia.com>). W świetle przytoczonych danych zastępowanie lub łączenie stali ferrytycznej z austenityczną jest pod względem ekonomicznym w pełni uzasadnione.

Ze względów technicznych od złączy spawanych wymaga się odpowiednich właściwości mechanicznych takich jak: wytrzymałość na rozciąganie, zginanie, ciągliwość, udarność oraz odporności na działanie agresywnych mediów. Połączenia różnoimienne mają zastosowanie w budowie chemikaliowców, aparatury i instalacji chemicznych, siłowniach parowych itp. (Lancaster, 1967; Dunn i Bergstrom, 2003; Łabanowski, 2005).

Autorzy prac dotyczących spawania stali typu „Duplex” (Ciechacki i Medaj, 2008; Łabanowski, 1997; Pocica i Bański, 2002; Bruzda i Łomozik, 2002; Łuko i Nowacki, 2004; Nowacki, 2009; Przetakiewicz i Kozak, 1995) w wyniku przeprowadzonych badań sygnalizują następujące problemy: możliwość powstawania pęknięć gorących, konieczność utrzymania optymalnej relacji ilościowej ferrytu i austenitu oraz możliwość wystąpienia fazy σ - FeCr.

W różnoimiennych złączach stali austenitycznej i ferrytycznej w obrębie złącza struktura w sposób ciągły zmienia się od austenitycznej poprzez obszar dwufazowy do struktury ferrytycznej. Nie do uniknięcia jest więc w złączu różnoimiennym tych stali wystąpienie sytuacji strukturalnej niekorzystnej z punktu widzenia połączeń stali duplex.

Możliwość kształtowania struktury i własności złącza stwarza zastosowanie odpowiedniego gatunku spoiwa. Autor (Lancaster, 1967) wskazuje, że złącza spawane bezpośrednio między rurami ze stali austenitycznej i stali ferrytycznej zachowują się zadowalająco w eksploatacji siłowni parowych i instalacji chemicznych. Spoiwem, które łączy w sobie najlepszą odporność na pękanie gorące i dobrą stabilność metalurgiczną w wysokiej temperaturze jest gatunek zawierający: 17% Cr, 13% Ni, 2,5% Mo.

W niniejszej pracy przyjęto do badań trzy gatunki spoiwa o strukturze austenitycznej, różne pod względem składu chemicznego i postaci (druć lity, druc proszkowy). Celem pracy jest ocena wpływu spoiwa na strukturę i wynikające z niej właściwości mechaniczne złącza różnoimiennego stal austenityczna-stal ferrytyczna.

2. MATERIAŁ, PROGRAM I METODYKA BADAŃ

Do badań przyjęto dwa gatunki stali wysokostopowych o składzie chemicznym podanym w tabeli 1. Blachy o grubości 5mm, ukosowane na V, spawano trzema gatunkami spoiwa oznaczonymi odpowiednio A, B, C. W dalszym ciągu pracy przyjęto oznaczenie poszczególnych złączy zgodnie z wyżej wymienionymi gatunkami spoiwa. Skład chemiczny przyjętych stali przedstawia tabela 1.

Tab. 1. Skład chemiczny materiałów podstawowych, % mas

| Gatunek | C | Cr | Mn | Ni | P | Si |
|--------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| X2CrNi12 | 0,020 | 11,240 | 0,540 | 0,350 | 0,021 | 0,660 |
| X5CrNi 18-10 | 0,017 | 18,112 | 1,797 | 8,070 | 0,028 | 0,292 |

Właściwości mechaniczne materiałów podstawowych podano w tabeli 2.

Tab. 2. Właściwości mechaniczne materiałów podstawowych

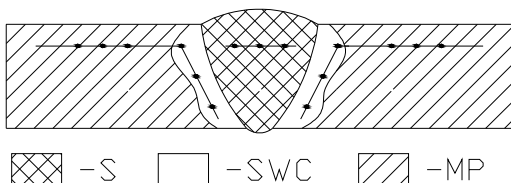
| Gatunek | R _m , MPa | R _{p0,2} , MPa | A ₅ , % | HRB |
|--------------|----------------------|-------------------------|--------------------|------|
| X2CrNi12 | 538,0 | 419,0 | 20,7 | 87,7 |
| X5CrNi 18-10 | 638,7 | 363,7 | 52,7 | 94,6 |

Skład chemiczny zastosowanych spoiw podano w tabeli 3.

Tab. 3. Skład chemiczny spoiw, % mas

| Ozn | Gatunek /postać | C | Cr | Mn | Ni | P | Si |
|-----|---|-------|--------|-------|--------|-------|-------|
| A | 309L-Si Drut lity | 0,020 | 23,200 | 1,900 | 13,800 | 0,016 | 0,780 |
| B | 307/G18 8 Mn Drut lity | 0,079 | 19,223 | 6,737 | 8,816 | 0,002 | 0,817 |
| C | OK. Tubrot 14.27 Drut proszkowany | 0,030 | 22,000 | 0,900 | 9,000 | - | 0,900 |

Doczołowe złącza spawane blach wykonano w dwóch przejściach stosując pierwszy ścieg przetopowy oraz drugi wypełniający. Spawano prądem stałym (DC-) metodą MAG z zastosowaniem gazu osłonowego będącego mieszanką 97,5% Ar + 2,5% CO₂.

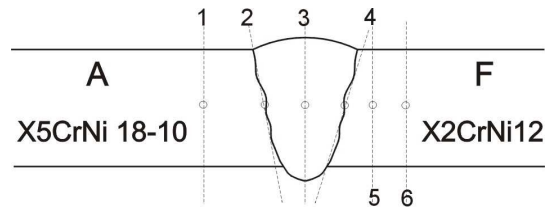


Rys. 1. Schemat złącza z zaznaczonymi miejscami pomiarów twardości HV10, S – spoina, SWC – strefa wpływu ciepła, MP – materiał podstawowy

Ze spawanych blach wycięto próbki do badań wytrzymałości na rozciąganie wg PN-EN ISO 6892-1. Badania udarności przeprowadzono na próbkach z karbem V zgodnie z PN-EN 10045-1 w temperaturze -20°C. Próbki do zginania odpowiadały wymaganiom podanym w normie PN-EN 15614-1. Z każdego złącza wykonano poprzeczne szlify makroskopowe trawione odczynnikami Adlera. Obserwacjom mikroskopowym poddano zglądy poprzeczne trawione odczynnikami na bazie kwasu fluorowodorowego. Na zglądach złączy spawanych określano rozkład twardości metodą Vickersa HV10 zgodnie ze schematem zamieszczonym na rysunku 1.

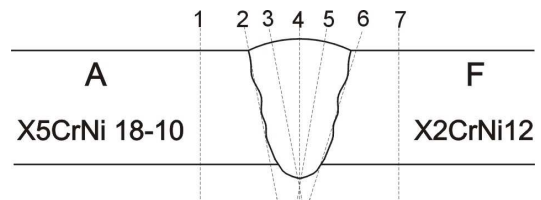
Pomiarów mikrotwardości na przekroju złączy spa-

wanych dokonano przy użyciu obiektywu Hannemana stosując obciążenie 1N. W miejscach zaznaczonych na rysunku 2 wykonano po 7 pomiarów mikrotwardości.



Rys. 2. Schemat złącza z zaznaczonymi miejscami pomiarów mikrotwardości

W celu pełniejszej charakterystyki faz wchodzących w skład badanych złączy na zglądach wzdłużnych wykonano dyfrakcyjne badania rentgenowskie, naświetlając wiązką promieniowania Rtg powierzchnie, których ślady zaznaczono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat złącza z zaznaczonymi śladami powierzchni zglądów naświetlanych wiązką promieniowania Rtg A – stal austenityczna, F – stal ferrytyczna

Zastosowano promieniowanie lampy z anodą kobaltową filtrowane żelazem. Dyfraktogramy rejestrowano w zakresie kątowym 2θ od 49,50° do 53,50° z krokiem 0,01°. W analizowanym przedziale kątowym występują linie dyfrakcyjne od płaszczyzn krystalograficznych {111} austenitu oraz {110} ferrytu. Na podstawie położenia kąтового maksimum tych linii wyliczono parametry sieciowe występujących faz wg wzoru:

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}, \quad (1)$$

gdzie: a – parametr sieciowy analizowanej fazy, nm; λ – długość fali promieniowania Rtg 0,179021, nm; θ – położenie kątowe maksimum linii dyfrakcyjnej, °; h, k, l – wskaźniki płaszczyzn wg Millera.

Analizie poddano również szerokości kątowe $b_{1/2}$ linii dyfrakcyjnych zmierzone w połowie ich maksymalnej intensywności względnej. Ilościową analizę fazową wykonano metodą bezpośredniego porównania Averbacha-Cohena (Karp i in., 1970). Udział objętościowy austenitu wyznaczano ze wzoru:

$$V_\gamma = \frac{1}{1 + \frac{I_\alpha}{I_\gamma} \cdot R} \cdot 100\%, \quad (2)$$

gdzie: I_α – intensywność całkowita względna linii {110} ferrytu; I_γ – intensywność całkowita względna linii {111} austenitu; R – współczynnik wynoszący 0,85.

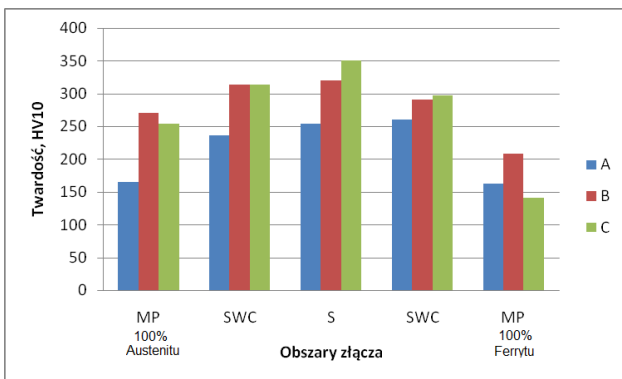
3. WYNIKI BADAŃ WRAZ Z ANALIZĄ

Skład chemiczny przyjętych do badań stali (Tab. 1) odpowiada gatunkom: X2CrNi12 o strukturze ferrytycznej i X5CRNi18-8 o strukturze austenitycznej. Wytrzymałość na rozciąganie R_m , stali X2CrNi12 powinna zgodnie z normą PN-EN 10088-1 wynosić 450÷650 MPa przy wydłużeniu względnym A_5 nie mniejszym od 20%. Wymagania wobec stali X5CrNi 18-10 są następujące: $R_m = 500÷700$ MPa przy $A_5 \geq 50\%$. Przyjęte do badań dwa gatunki stali spełniają wymagania określone normą (Tab. 2).

Tab. 4. Właściwości mechaniczne złączy – statyczna próba rozciągania

| Lp. | Oznaczenie złącza | R_m , MPa | Wydł. A_5 , % | Miejsce zerwania |
|-----|-------------------|-------------|-----------------|-------------------------------|
| 1. | A | 502,0 | 16,7 | SWC po stronie stali X2CrNi12 |
| 2. | B | 496,1 | 19,1 | |
| 3. | C | 502,0 | 16,7 | |

Zniszczenie złączy spawanych następowało we wszystkich przypadkach w stali o strukturze ferrytycznej w bezpośrednim sąsiedztwie strefy wpływu ciepła. Należy zauważyć, iż zarówno wartości R_m jak i A_5 określone na złączach spawanych są mniejsze od uzyskanych w badaniach testowych dla materiału podstawowego stali X2CrNi12. Ta obserwacja wskazuje na zachodzenie podczas cyklu cieplnego spawania zjawisk strukturalnych obniżających w konsekwencji równocześnie właściwości wytrzymałościowe jak i plastyczne stali X2CrNi12. Skutkuje tu zapewne przesylenie roztworu stałego i rozrost ziaren fazy α w strefie przegrzania.



Rys. 4. Twardość średnia HV10 w poszczególnych strefach złączy spawanych

Wyniki prób zginania wszystkich złączy, zarówno w przypadku naprężeń rozciągających od strony lica, jak i grani spoiny dały rezultat pozytywny. Kąt gięcia osiągnął 180°. Badania wizualne złączy poddanych próbie zginania nie wykazały obecności naderwań ani pęknięć. Jest to wynik świadczący o dużej plastyczności, prawidłowej, pozbawionej wad makrostruktury jak i braku kruchych składni-

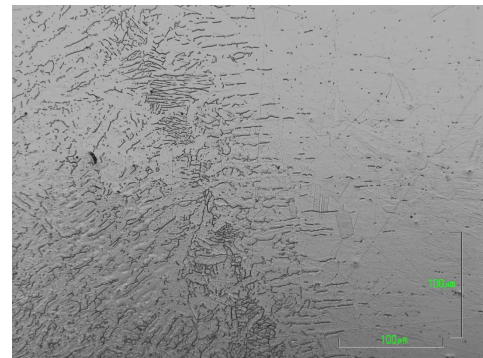
ków mikrostruktury. Przeprowadzone badania radiograficzne nie wykazały występowania wad złączy spawanych typu pęknięcia, przyklejenia, pęcherze.

Rozkład twardości HV10 dla poszczególnych obszarów złączy przedstawia wykres na rysunku 4. W każdej strefie złączy wykonano po 3 pomiary twardości wg. schematu na rysunku 1.

Twardość w SWC (Rys. 4) jest podwyższona względem materiału podstawowego zarówno po stronie stali austenitycznej jak i ferrytycznej. Maksimum twardości przypada w strefie spoiny. Wystąpienie maksimum twardości w centralnej strefie spoiny należy przypisać umocnieniu roztworowemu oraz drobnoziarnistości struktury. W przypadku każdego ze złączy, spoiwo wprowadza do strefy spoiny zwiększoną zawartość składników stopowych (Cr, Ni, Mn, Si), od występującej w materiałach podstawowych. Spoiwo B i C wprowadza do spoin dodatkowo podwyższony udział węgla (Tab. 1, Tab. 3).

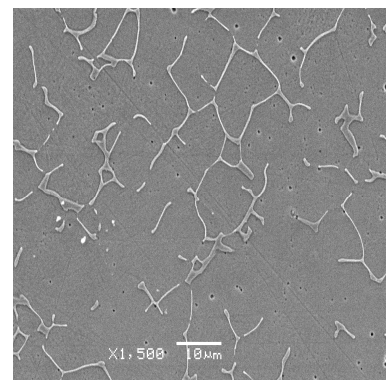
Badania makroskopowe złączy spawanych wykazały w każdym przypadku prawidłowy przetop, brak pęknięć, przyklejeń, pęcherzy, wtrąceń i poprawne uformowanie lica i grani spoiny. Strefa wpływu ciepła po stronie stali ferrytycznej jest szersza aniżeli po stronie stali austenitycznej.

Charakterystyczne obszary złącza spawanego wykonane spoiwem A przedstawiają Rys. 5, 6, 7. Rys. 5 przedstawia mikrostrukturę na granicy materiału podstawowego i spoiny od strony stali austenitycznej

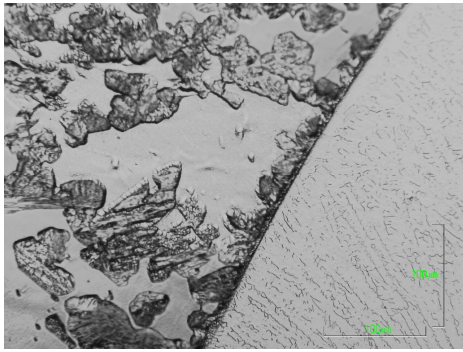


Rys. 5. Mikrostruktura obszaru granicznego, spoina – materiał podstawowy od strony stali austenitycznej, spoiwo A

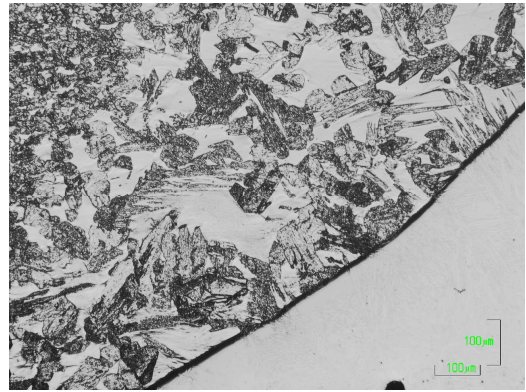
Rysunek 6 przedstawia obszar środkowy spoiny natomiast rysunek 7 ilustruje obszar graniczny spoina – materiał podstawowy od strony stali ferrytycznej.



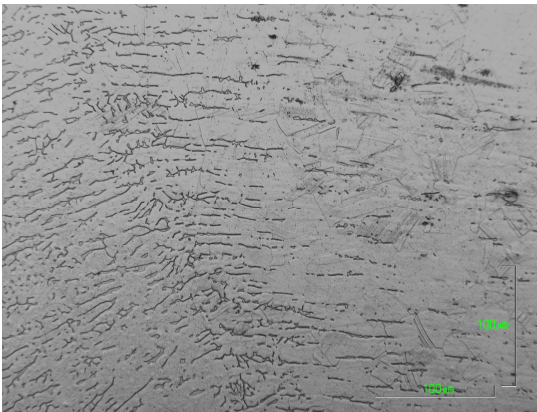
Rys. 6. Mikrostruktura obszaru środkowego spoiny, spoiwo A



Rys. 7. Mikrostruktura obszaru granicznego, spoina- materiał podstawowy, od strony stali ferrytycznej, spoiwo A



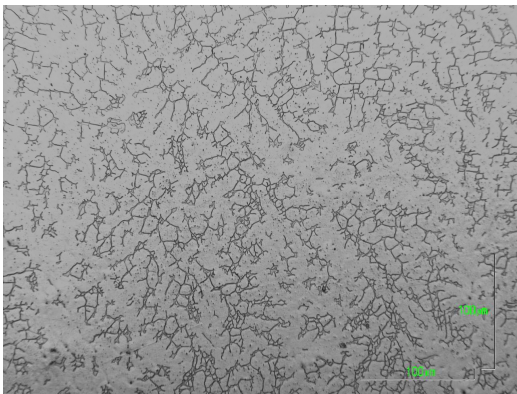
Rys. 10. Mikrostruktura obszaru granicznego, spoina – materiał podstawowy, od strony stali ferrytycznej, spoiwo B



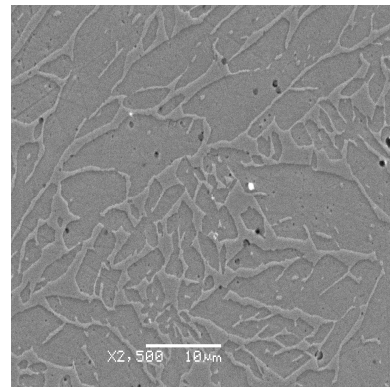
Rys. 8. Mikrostruktura obszaru granicznego, spoina – materiał podstawowy, od strony stali austenitycznej, spoiwo B



Rys. 11. Mikrostruktura obszaru granicznego, spoina – materiał podstawowy, od strony stali austenitycznej, spoiwo C



Rys. 9. Mikrostruktura obszaru środkowego spoiny, spoiwo B



Rys. 12. Mikrostruktura obszaru środkowego spoiny, spoiwo C

Wybrane mikroobszary złącza spawanego przy użyciu spoiwa B przedstawiają rysunki 8, 9, 10. Rysunek 8 przedstawia mikrostrukturę na granicy materiału rodzimego i spoiny od strony stali o strukturze austenitycznej.

Rys. 9 przedstawia obszar środkowy spoiny natomiast Rys. 10 ilustruje obszar graniczny spoina – materiał podstawowy od strony stali ferrytycznej.

Wybrane mikroobszary złącza spawanego przy użyciu spoiwa C przedstawiają Rys. 11, 12, 13. Rys. 11 przedstawia mikrostrukturę na granicy materiału podstawowego i spoiny od strony stali o strukturze austenitycznej.

Rys. 12 przedstawia obszar środkowy spoiny natomiast Rys. 13 ilustruje granicę spoiny od strony stali ferrytycznej.



Rys. 13. Mikrostruktura obszaru granicznego, spoina – materiał podstawowy, od strony stali ferrytycznej, spoiwo C

Analiza mikrostruktury złączy A,B,C przedstawionych na Rys. 5, 8, 11 wykazuje, iż w mikroobszarze stal austenitczna – spoina występują kryształy międzykomórkowego ferrytu na tle austenitu. W przypadkach złączy A i B są one względem siebie równoległe (Rys. 5, 8) natomiast w złączy C brak jest wyraźnej orientacji (Rys. 11). Granica materiał podstawowy – spoina ma łagodne przejście. W środkowej strefie złączy A, B i C (Rys. 6, 9, 12) występuje mieszanina austenitczno – ferrytyczna o siatkowym rozmieszczeniu ferrytu. Siatkowa postać ferrytu pozwala na wyznaczenie średniej średnicy ziarna austenitu. Wynosi ona odpowiednio dla złączy A, B, C: 14,8; 19,4; 13,6 μm . W strefie spoiny graniczącej bezpośrednio ze stalą ferrytyczną, występują jasne ziarna ferrytu i trawiące się szaro ziarna mieszaniny ferrytu i austenitu (Rys. 7, 10, 13) Średni rozmiar ziaren ferrytu w poszczególnych złączach wynosi: A – 136 μm , B – 150 μm , C – 152 μm . Jest więc około o jeden rząd wielkości większy od rozmiaru ziaren austenitu w środku spoiny. Granica spoina – materiał podstawowy w przypadku każdego złącza jest ostra (Rys. 7, 10, 13).

Tab. 5. Wyniki pomiarów mikrotwardości

| Spoiwo | Skład fazowy | Miejsce pomiaru wg Rys.2 | Mikrotwardość HV0,1 | | Odchylenie standardowe, s | |
|--------|--------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|---|
| A | F | 1 | MP | 242,5 | | 14,2 |
| | | 2 | SWC/S | 268,9 | | 15,8 |
| | F+A | 3 | S | 290,7 | | 25,2 |
| | | 4 | S/SWC | ziarna białe 187,8 | ziarna szare 368,7 | ziarna białe 6,8 ziarna szare 34,1 |
| | | 5 | SWC | 319,2 | | 15,4 |
| | A | 6 | MP | 157 | | 9,6 |
| B | F | 1 | MP | 295,9 | | 24,8 |
| | | 2 | SWC/S | 294,7 | | 7,5 |
| | | 3 | S | 251,9 | | 11,7 |
| | F+A | 4 | S/SWC | ziarna białe 192,8 | ziarna szare 318,0 | ziarna białe 8,3 ziarna szare 17,9 |
| | | 5 | SWC | 275,7 | | 27,1 |
| | A | 6 | MP | 203,1 | | 7,5 |
| C | F | 1 | MP | 330,8 | | 24,4 |
| | | 2 | SWC/S | 341,2 | | 7,6 |
| | | 3 | S | 348,1 | | 11,0 |
| | F+A | 4 | S/SWC | ziarna białe 195,0 | ziarna szare 325,5 | ziarna białe 9,8 ziarna szare 45,3 |
| | | 5 | SWC | 285,4 | | 24,1 |
| | A | 6 | MP | 170,1 | | 5,8 |

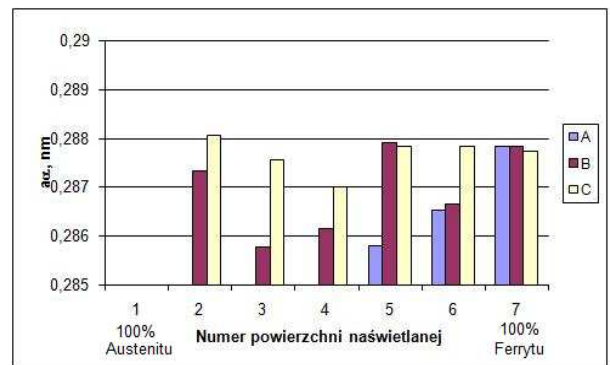
Pomiary mikrotwardości wykazują wzrost μHV01 w kierunku osi spoiny idąc zarówno od strony stali ferrytycznej jak i austenitcznej. Otrzymane wartości μHV01 zawierają się w granicach od 157 do 348 (Tab. 5). Takim wartościom μHV01 odpowiadają przekątne odcinków

od 23,1 do 34,4 μm . Są to wartości przekraczające średnią średnicę ziaren austenitu. W przypadku mieszaniny fazowej pod węglnikiem znajdowały się zarówno ziarna austenitu jak i ferrytu. Dlatego też rozkład mikrotwardości w złączach jest analogiczny do rozkładu makrotwardości. Duży rozmiar ziaren ferrytu i mieszaniny ferrytyczno – austenitcznej w miejscu pomiaru nr 4, (Tab. 5), (Rys. 7, 10, 13) pozwolił na jednoznaczne wyznaczenie mikrotwardości tych składników struktury. Mikrotwardość ferrytu mieści się pomiędzy 188 a 195 μHV01 , natomiast mieszaniny ferrytyczno – austenitcznej od 318 do 369 μHV (Tab. 5).

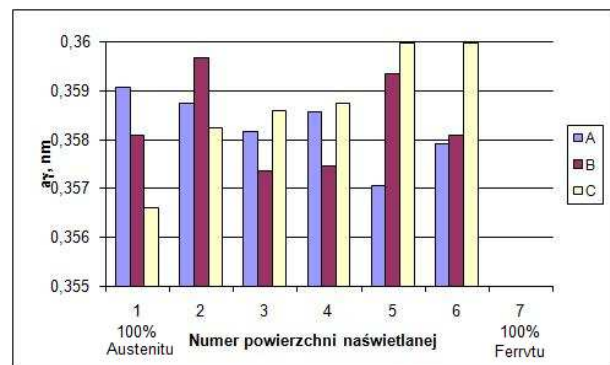
Pomiary mikrotwardości nie wykazały występowania w jakimkolwiek miejscu złączy fazy $\sigma\text{-FeCr}$, której to mikrotwardość wg literatury wynosi około 940 HV (Przybyłowicz, 2008).

Badania jakościowe rentgenograficzne materiałów podstawowych wykazały, iż w przypadku stali X2CrNi12 jedyłą fazą jest ferryt, natomiast w stali X5CrNi 18–8 wyłącznie austenit. Wyniki dyfrakcyjnych badań rentgenowskich potwierdzają obserwacje mikroskopowe.

Sporządzono wykresy parametru sieciowego i szerokości połówkowej linii dyfrakcyjnej $\{110\}$ fazy α oraz $\{111\}$ fazy γ , w zależności od usytuowania powierzchni naświetlanej wiązką promieniowania Rtg zgodnego ze schematem na Rys. 3. Zmiany parametru sieciowego ferrytu a_α w obrębie złączy przedstawia Rys. 14, natomiast austenitu a_γ , Rys. 15.

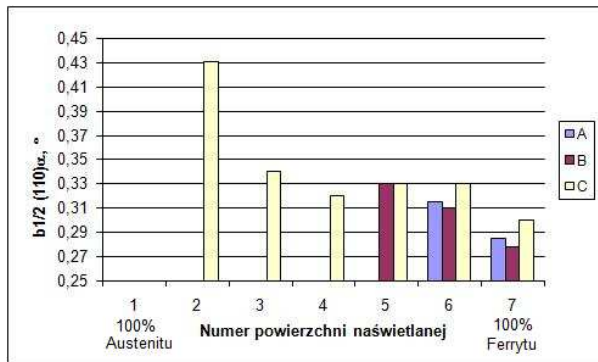


Rys. 14. Parametr sieciowy ferrytu w zależności od usytuowania powierzchni naświetlanej

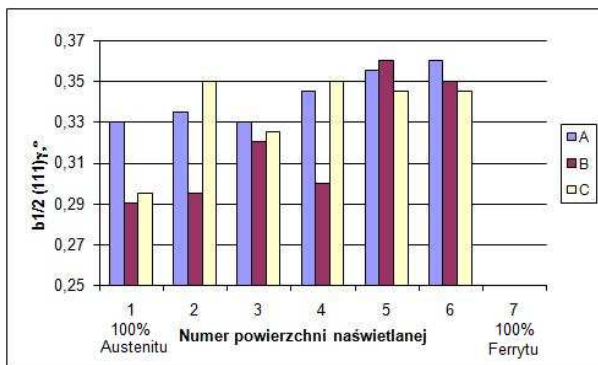


Rys. 15. Parametr sieciowy austenitu w zależności od usytuowania powierzchni naświetlanej

Zmiany szerokości połówkowej linii dyfrakcyjnej ferrytu $\{110\}$ $b_{1/2(110)\alpha}$ w obrębie złączy przedstawia Rys. 16, natomiast austenitu $\{111\}$ $b_{1/2(111)\gamma}$ Rys. 17.



Rys. 16. Szerokość połówkowa linii $\{110\}$ ferrytu w zależności od usytuowania powierzchni naświetlanej



Rys. 17. Szerokość połówkowa linii $\{111\}$ austenitu w zależności od usytuowania powierzchni naświetlanej

Parametr sieciowy ferrytu i austenitu nie wykazuje jednoznacznego związku z usytuowaniem powierzchni naświetlania wiązką promieniowania Rtg (Rys. 14, 15). Spostrzeżenie to dotyczy wszystkich analizowanych złączy.

Parametr sieciowy roztworu stałego dwuskładnikowego zmienia się liniowo wraz ze zmianą stężenia składnika rozpuszczonego. Zależność ta, znana jak prawo Vegarda, wykazuje w różnym stopniu dodatnie lub ujemne odchylenie (Cullity, 1964).

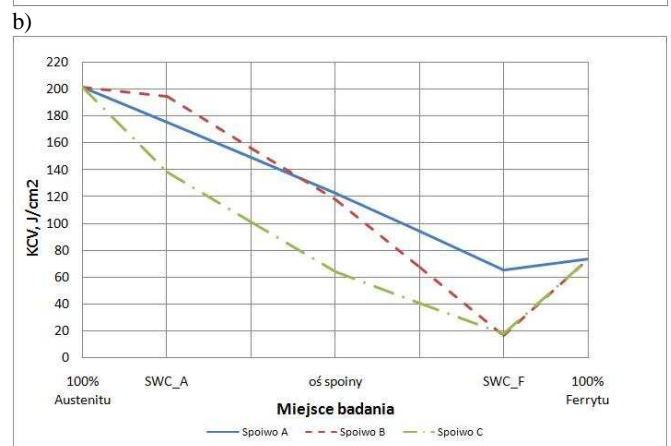
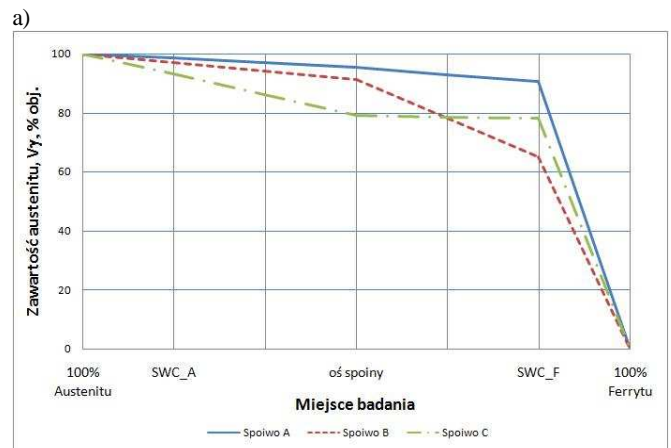
W analizowanych złączach występują wieloskładnikowe roztwory stałe (ferryt, austenit), ze składnikami, których atomu zajmują pozycję węzłowe (chrom, nikiel, mangan, krzem) lub międzywęzłowe (węgiel, azot) w sieci metalu podstawowego – żelaza.

Atomy pierwiastków rozmieszczone międzywęzłowo (C, N) oraz chrom, mangan i nikiel powodują każde z osobna z różną intensywnością ekspansję sieci ferrytu, natomiast krzem wywołuje jej silną kontrakcję. Parametr sieciowy austenitu maleje w miarę zwiększania zawartości niklu (Glocker, 1936).

Wobec nieaddytywnego oddziaływania składników stopowych na parametr sieciowy analizowanych roztworów stałych i nieznaną rzeczywistego rozdziału pierwiastków pomiędzy współistniejące fazy w poszczególnych obszarach złączy trudno zinterpretować otrzymane zależności.

Szerokość połówkowa linii dyfrakcyjnej $\{110\}$ ferrytu oraz $\{111\}$ austenitu ma natomiast wyraźny związek z usytuowaniem powierzchni, z której wykonano dyfraktogram (wg Rys. 3).

Szerokość połówkowa linii $\{110\}$ ferrytu zmniejsza się wraz z przemieszczaniem badanej powierzchni od strony stali austenitycznej w kierunku stali ferrytycznej (Rys. 16). Szerokość połówkowa linii dyfrakcyjnej $\{111\}$ austenitu zmniejsza się od strony stali ferrytycznej w kierunku stali austenitycznej (Rys. 17).



Rys. 18. Zawartość austenitu (a) oraz udarność KCV (b) w poszczególnych obszarach złączy

Szerokość połówkowa linii dyfrakcyjnej roztworu stałego w głównej mierze zależna jest od wielkości ziarna (rozmiarów bloków mozaiki) oraz obecności naprężeń własnych drugiego rodzaju. Zmniejszenie wielkości ziarna i występowanie naprężeń o różnych znakach równoważących się pomiędzy ziarnami powoduje poszerzenie linii dyfrakcyjnych (Rusakov, 1977). Należy przyjąć, iż swój wkład w poszerzenie linii dyfrakcyjnych wnoszą również stopień nasilenia mikrosegregacji chemicznej. Szerokość połówkowa linii dyfrakcyjnych ma bezpośredni związek z udziałem objętościowym poszczególnych faz. Wraz ze zmniejszeniem udziału objętościowego danej fazy wzrasta szerokość połówkowa linii dyfrakcyjnej tej fazy. Rozmiary ziaren międzykomórkowego ferrytu w obszarze granicznym spoiny z SWC od strony stali austenitycznej są bardzo małe. Podobnie płytkowe kryształity austenitu wchodzące w skład

mieszaniny austenityczno-ferrytycznej w strefie spoiny graniczącej ze stalą ferrytyczną mają bardzo małą grubość. Strefy wpływu ciepła po obu stronach spoiny są obszarami o też największym gradiencie temperatury podczas cieplnego cyklu spawania, stąd można się spodziewać generowania tutaj dużych naprężeń. Wykres zawartości austenitu oraz udarności KCV w poszczególnych obszarach złączy przedstawia Rys. 18.

Zawartość austenitu zmniejsza się łagodnie począwszy od strony stali austenitycznej do SWC po stronie stali ferrytycznej po czym wykazuje spadek.

Zawartość austenitu określona na przekroju osiowym spoiny ma ścisły związek ze składem chemicznym zastosowanego spoiwa. Zawartość niklu w spoiwie A wynosi 13,8% Ni i jest największa spośród użytych spoiw. W konsekwencji udział objętościowy austenitu jest w tym przypadku 96,5% obj. Zawartość austenitu w przekroju osiowym złącza B jest nieco mniejsza i wynosi 91,4% obj. Spoiwo B zawiera najmniej niklu spośród zastosowanych spoiw (8,8% Ni), ale w jego składzie występuje w znacznej ilości austenitotwórczy mangan (6,7% Mn). Najmniejszą zawartość austenitu (79,1% obj.) otrzymano przy użyciu spoiwa C. Spoiwo C ma zawartość niklu zbliżoną do spoiwa B, lecz zawartość manganu wynosi 0,9% Mn.

Udarność KCV wykazuje związek ze składem strukturalnym. Największą udarność w newralgicznej strefie SWC po stronie stali ferrytycznej wykazuje złącze A wykonane spoiwem o największej zawartości niklu. Udarność w tej strefie jest nieznacznie mniejsza od udarności materiału podstawowego - stali ferrytycznej. Udarność złączy B i C w tej strefie jest około 3 krotnie mniejsza aniżeli w złączu A. (Rys. 18).

4. PODSUMOWANIE

Spawanie doczołowe blach stali X2CrNi12 o strukturze ferrytycznej ze stalą X5CrNi 18-10 o strukturze austenitycznej metodą MAG przy użyciu każdego z zastosowanych spoiw pozwala uzyskać poprawne pod względem makrostruktury złącza. Statyczna próba rozciągania wykazuje, iż zniszczenie następuje w materiale podstawowym blachy o strukturze ferrytycznej w pobliżu SWC. Wartość wytrzymałości na rozciąganie jak i wydłużenia odpowiadają materiałowi podstawowemu. Dla każdego złącza próba statycznego zginania ma wynik pozytywny. W złączach występują wyłącznie dwie fazy ferryt i austenit bez wydzielenia fazy σ -FeCr. Wzajemna relacja ilościowa tych faz zależy od rodzaju spoiwa.

Pośród przyjętych spoiw za najkorzystniejsze pod względem kompleksu właściwości wytrzymałościowych, twardości i udarności należy uznać spoiwo A o największej zawartości niklu.

Ostra granica pomiędzy spoiną a materiałem podstawowym ferrytycznym (karb strukturalny) oraz przesycenie faz w tym mikroobszarze spoiny są okolicznościami negatywnie oddziałującymi na własności dynamiczne złączy.

Dalsze badania różnorodnych połączeń spawanych stali austenitycznych z ferrytycznymi należałoby uzupełnić o mikroanalizę składu chemicznego (MAR) w poszczególnych obszarach złączy. Pozwoliłoby to na powiązanie składu chemicznego spoiwa oraz warunków spawania z rzeczywistym rozkładem

składników stopowych w obrębie złączy, decydującym o składzie fazowym.

LITERATURA

1. **Brózda J., Łomozik M.** (2002), Spawanie stali nierdzewnych o strukturze dwufazowej (duplex). Własności złączy spawanych., *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa nr 2*.
2. **Ciechacki K., Medaj D.** (2008), The properties of welded joints from austenitic-ferrite steel of duplex type made using smaw method, *12th International Conference on Development in Machinery Design and Control Nowogród*.
3. **Cullity B. D.** (1964), *Podstawy dyfrakcji promieni rentgenowskich*, WNT, Warszawa.
4. **Dunn J. J., Bergstrom D. S.** (2003), Development of new "lean" duplex stainless steel, Alloy (UNS S32003)" *Stainless Steel World*.
5. **Glocker R.** (1936), *Materialprüfung mit Röntgenstrahlen*, Verlag von Julius Springer, Berlin.
6. **Karp J. i In.** (1970), Problemy związane z określeniem austenitu szczątkowego metodą rentgenowską, *Zeszyty naukowe AGH nr 265, Metalurgia i Odlewnictwo*.
7. **Lancaster J. F.** (1967), *Metalurgia procesów spawalniczych*, WNT, Warszawa.
8. **Łabanowski J.** (1997), Problemy spawalności odpornych na korozję stali austenityczno-ferrytycznych", *Krajowa Konferencja Dobór i Eksploatacja Materiałów Inżynierskich, Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny*, 467-473.
9. **Łabanowski J.** (2005), Mechanical properties of dissimilar welded joints for chemical tankers, *Marine Technology Transactions*, Vol.16, 139-149.
10. **Łukojć A., Nowacki J.** (2004), Przemiany SWC podczas spawania stali duplex, *Przegląd Spawalnictwa nr 4*.
11. **Nowacki J.** (2009), *Stal duplex i jej spawalność*, WNT, Warszawa.
12. **Pocica A., Bański R.** (2002), Badania połączeń spawanych ze stali austenityczno-ferrytycznej, *42 Naukowo-Techniczna Konferencja Spawalnicza Techniki Komputerowe w Spawalnictwie*, 116-119.
13. **Przetakiewicz W., Kozak R.** (1995), Niektóre aspekty spawalności ferrytyczno-austenitycznych stali typu duplex i superduplex", *Przegląd Spawalnictwa nr 3*.
14. **Przybyłowicz K.** (2008), *Inżynieria stopów żelaza, Politechnika Świętokrzyska*, Kielce.
15. **Rusakov A. A.** (1977), *Rentgenografia metallov*, Atomizdat, Moskwa.
16. <http://www.stalnierdzewna.com> (29.01.2010)

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF FERRITIC STEEL X2CrNi12 WITH AUSTENITIC STEEL X5CrNi 18-10

Abstract: The basic aim of this work is the connection of the microstructure of different joints with mechanical properties. In the range of mechanical properties the micro and macro hardness, impact tests, tensile and bending strength of welded joints were measured. For microstructure investigations the light scanning electron microscopy SEM and X – ray diffraction methods were used.

The ferritic X2CrNi12 and austenitic X5CrNi 18-10 steels in the form of 5 mm thick sheets were taken for investigation.