

DANIEL MEDAJ

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

WPLYW WYBRANYCH PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH NA WŁASNOŚCI MECHANICZNE ZŁĄCZY SPAWANYCH ZE STALI TYPU „DUPLEX”

W ostatnich latach często stosowanym materiałem powoli wypierającym znane stale austenityczne w budowie aparatury chemicznej są stale austenityczno-ferrytyczne typu „DUPLEX”, znacznie tańsze, mające mniej niklu, o dobrej odporności chemicznej i właściwościach mechanicznych. Spawalność stali w istotny sposób zależy od austenityczno-ferrytycznej struktury. Złącza spawane wykonywane zgodnie z normą PN EN ISO 15614, mimo że spełniają wymogi techniczne, często różnią się w swojej strukturze i właściwościach. Niniejszy artykuł ma przybliżyć problematykę spawalności stali „DUPLEX” za pomocą analizy parametrów technologicznych procesu.

Słowa kluczowe: DUPLEX, spawanie, energia liniowa, twardość

1. „DUPLEX” – NOWOCZESNE ROZWIĄZANIA

Wzrost cen niklu na giełdach światowych wpływa na wyższe ceny materiałów, w których jest znaczny udział tego surowca. Stale odporne na korozję typu „DUPLEX” mają strukturę austenityczno-ferrytyczną. Pierwsze tego typu stale charakteryzowały się kruchością oraz małą granicą plastyczności. Dopiero w latach 70-tych XX wieku opracowano stopy posiadające pełne walory użytkowe, co umożliwiło powszechne stosowanie „DUPLEXU”. Stale austenityczne mogą zawierać do 30% niklu, co wpływa na cenę gotowego wyrobu. Alternatywą dla stali austenitycznych są stale o strukturze austenityczno-ferrytycznej typu „DUPLEX”, w których zawartość niklu nie przekracza 10% (tab. 1). Fakt ten znacząco wpływa na obniżenie kosztów samego materiału, a w konsekwencji minimalizację kosztów produkcji [5].

Stopy stali „DUPLEX” ze względu na swoje dobre właściwości korozyjne i wytrzymałościowe stosowane są jako alternatywa dla stali chromowo-niklowych i stopów na bazie niklu, w przemyśle petrochemicznym, farmaceutycznym, a w ostatnich latach coraz częściej w przemyśle papierniczym [1].

Tabela 1. Przykładowe stale DUPLEX oraz ich skład chemiczny

Gatunek wg EN	Cr %	Ni %	N %
1.4162	21,5	1,5	0,22
1.4362	23	4,8	0,1
1.4410	25	7,0	0,27
1.4462	22	5,7	0,17
1.4501	25	7,0	0,27

Cechą charakterystyczną stali odpornych na korozję „DUPLEX” jest jej dwufazowość, która w dużej mierze zależy od ilości wprowadzonego ciepła oraz dodatków stopowych [9].

Pierwiastkami odpowiedzialnymi za powstawanie struktury austenicznej są pierwiastki austenitotwórcze, takie jak: nikiel, azot, molibden. W stosunku do stali austenicznych zasadniczo wzbogaconych w nikiel, stal typu „DUPLEX” zawiera do 10% tego dodatku stopowego. W takich warunkach, aby zachować prawidłowe proporcje strukturalne konieczne jest ściśle kontrolowanie ilości doprowadzonego ciepła, szczególnie w dolnych zakresach dopuszczalnych energii liniowej [2]. Energia liniowa ma decydujący wpływ na własności złączy spawanych ze stali typu „DUPLEX”. Jej wielkość decyduje o procentowym udziale struktury ferrytycznej i austenicznej, wpływającej na własności korozyjne oraz wytrzymałościowe złączy spawanych [6].

Takie warunki skutecznie odstraszały konstruktorów od szerokiego stosowania tego tworzywa. Jednak czy sceptyczne podejście i wysokie wymagania technologiczne procesu spawania są w pełni uzasadnione?

2. SPAWALNOŚĆ STALI „DUPLEX”

W procesie spawania materiał spoiny przechodzi ze stanu ciekłego w stan stały. W początkowej fazie przyjmuje on całkowicie postać ferrytu delta, a następnie w wyniku ochładzania zmienia się w austenit. W stanie równowagi temperatura przemiany wynosi ok. 1250°C. Wówczas ilość austenitu obecnego w mikrostrukturze zależy od zawartości składników stopowych i szybkości chłodzenia [1].

W każdej ze stref złącza spawanego przemiany te zachodzą indywidualnie, co wpływa na lokalne zróżnicowanie strukturalne, a tym samym na zmianę własności złączy spawanych.

Zgodnie z praktyką spawalniczą, na obniżenie odporności korozyjnej i udatności złączy mają wpływ trzy typy wydzielen:

- międzymetaliczna faza σ ,
- azotki chromu,
- austenit wtórny γ_2 .

Pseudopodwójny układ równowagi faz ukazuje, że na początku podczas krzepnięcia metalu powstaje wyłącznie struktura ferrytyczna, a jej dalsze stygnięcie poniżej 1300°C stymuluje powstawanie struktury austenicznej. Najlepsze własności wytrzymałościowe i odporność korozyjną uzyskuje się przy zawartości austenitu od 30 do 60%. Jednak aby uzyskać optymalny rozkład strukturalny niezbędne jest zachowanie podstawowych zasad dotyczących spawalności stali „DUPLEX” [8].

Utrzymanie zrównoważonego udziału ferrytu i austenitu w poszczególnych obszarach złącza jest bardzo ważne dla otrzymania odpowiednich własności złącza [1].

Spawanie stali „DUPLEX”, podobnie jak w przypadku innych stopów, sprowadza się do ponownej ingerencji metalurgicznej w obszar spoiny. Zjawiska zachodzące w obszarze złącza spawanego, w spoinie MS, strefie wpływu ciepła SWC oraz w materiale rodzimym MR zmieniają strukturę materiału zarówno w fazie ciekłej, jak i w stanie stałym.

Powoduje to powstawanie naprężeń własnych i deformacji oraz i zmianę procentowego udziału ferrytu i austenitu w zależności od wielkości energii wewnętrznej w obszarze złącza spawanego [12]

$$E = \sum_{i=1}^n \varphi_i \psi_i \quad (1)$$

gdzie:

- φ_i – parametr intensywny,
- ψ_i – wielkość ekstensywna.

Do oceny cech mechanicznych połączeń spawanych można użyć następującej zależności [10]:

$$x = \sum_{n=1}^N X_n \xi_n \quad (2)$$

$$\sum_{n=1}^N \xi_n = 1 \quad (3)$$

gdzie:

- x – fizyczne i mechaniczne własności materiału,
- X_n – liniowa kombinacja składników fazowych,
- ξ_n – udział objętościowy składników.

W takiej sytuacji fizyczne i mechaniczne własności materiału traktuje się jako liniową kombinację składników fazowych i ich udziałów objętościowych [3].

2.1. Wpływ energii liniowej na własności złączy spawanych

Wielkość energii liniowej decyduje o procentowym udziale struktury ferrytycznej i austenitycznej. Ma to wpływ na właściwości korozyjne oraz wytrzymałościowe złączy spawanych [4].

Na szczególną uwagę zasługuje strefa wpływu ciepła (SWC) złącza spawanego, gdzie jej szerokość ściśle powiązana jest z wielkością energii liniowej [6].

Energię liniową w łuku spawalniczym można wyznaczyć za pomocą poniższego wzoru:

$$E_{SO} = \frac{1}{t_{s2} + t_{s1}} \int_{t_{s1}}^{t_{s2}} \frac{U_{SO}(t) \cdot I_S(t)}{V_S(t)} dt \quad (4)$$

Jednak ze względu na jego złożoność oraz niemożność pomiaru bezpośredniego napięcia łuku stosuje się wersję uproszczoną, określającą rzeczywistą energię użyteczną (ok 15% błędu) [5]:

$$E = \frac{U_S I_S}{v_S} \eta_S \quad (5)$$

Zmienny rozkład austenitu i ferrytu w stalach austenityczno-ferrytycznych typu „DUPLEX”, morfologia i wielkość ziaren ferrytu i austenitu oraz rodzaj, rozkład węglików, azotków i szeregu faz międzymetalicznych, których wpływ na własności SWC jest najczęściej niekorzystny, wpływają na zróżnicowanie własności mechanicznych poszczególnych obszarów złączy spawanych w zależności od zmieniających się parametrów ekstensywnych i intensywnych podczas wykonywania złącza [6, 9].

Zgodnie z metodami Eulera i Lagrange'a dobór odpowiedniego parametru intensywnego φ_i związanego z wielkością ekstensywną Ψ_i i energią E określa się ze wzoru:

$$\psi_i = \frac{\partial E}{\partial \psi_i} \quad (6)$$

Z równania wynika, że znajomość procesów w czasie powstawania złącza z odpowiednim doбором parametrów intensywnych umożliwia aktywne modelowanie i sterowanie procesem spawania [12].

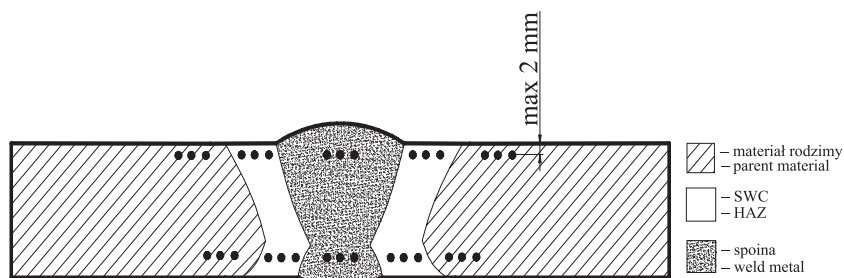
Nieodpowiednia ilość ciepła doprowadzona do obszaru spoiny może pogorszyć własności korozyjne i wytrzymałościowe złącza, zwłaszcza gdy temperatura międzysciegowa jest zbyt wysoka lub ze względu na charakter konstrukcji ciepło nie może być skutecznie odprowadzane. Wyższa temperatura i mniejsza szybkość chłodzenia prowadzą do najkorzystniejszych warunków przemiany w stalach austenityczno-ferrytycznych [1].

Przy znacznych grubościach materiału w miarę oddalania się od jeziorka spawalniczego prędkość odprowadzania ciepła jest znacząco wyższa, a w konsekwencji czas potrzebny do wytworzenia austenitu może być niewystarczający. Dlatego w procesie spawania stali „DUPLEX” niezbędne jest, aby energia liniowa spawania była na tyle duża, aby dopuszczalna wartość minimalna umożliwiła zaistnienie przemiany w SWC [6, 8].

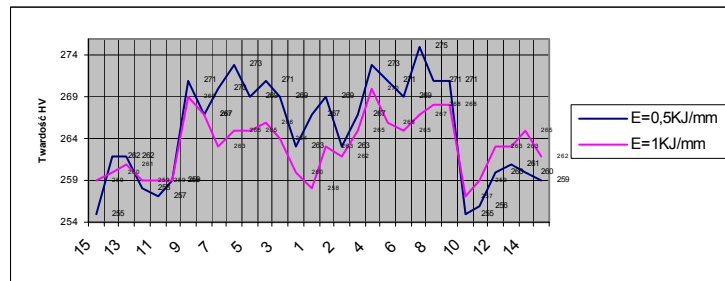
Zgodnie z normą EN 1011-3 dla stali o zawartości 22% Cr ilość wprowadzonego ciepła nie powinna przekraczać $0,5-2,5 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$, a w przypadku stali zawierających 25% Cr powinna oscylować na poziomie $0,2-1,5 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ [1].

2.2. Spawanie stali „DUPLEX”

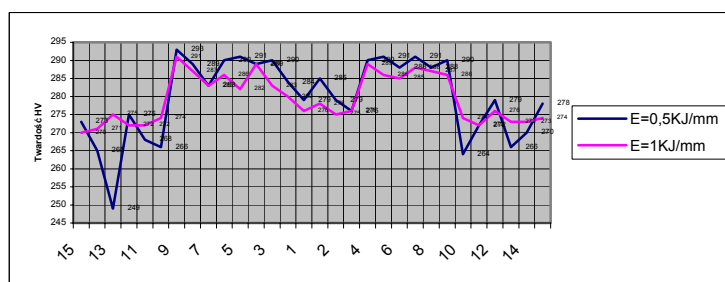
W zależności od ilości wprowadzonego ciepła zmienia się mikrostruktura poszczególnych stref złącza, zmieniając lokalnie jego własności mechaniczne. Twardość, wyznaczona na próbkach (rys. 1) spawanych metodą 111 w pozycji PC i PF z użyciem spoiwa Avesta różni się w zależności od ilości wprowadzonego ciepła. Z poniższych wykresów (rys. 2-5) wynika, że dla większej ilości ciepła krzywa twardości ma łagodniejszy przebieg. Zwiększenie energii liniowej sprzyja zatem jednorodności strukturalnej złącza poprawiając własności eksploatacyjne. Złącze spawane w pozycji PF wykazuje mniejsze różnice w twardości pomiędzy MR, SWC, MS.



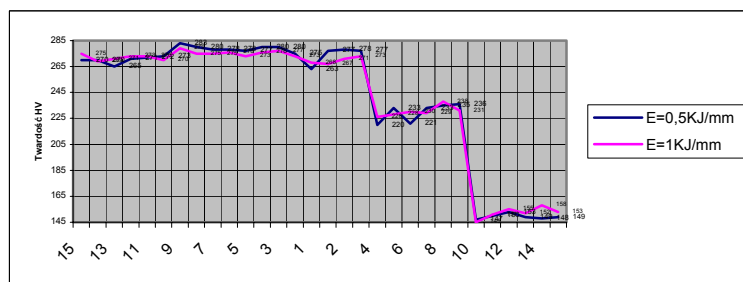
Rys. 1. Rozmieszczenie punktów pomiaru twardości na złączu



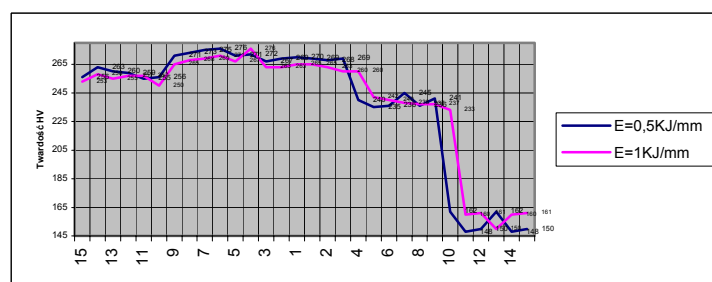
Rys. 2. Krzywe twardości w poszczególnych strefach złącza ze stali 1.4162



Rys. 3. Krzywe twardości w poszczególnych strefach złącza ze stali 1.4462

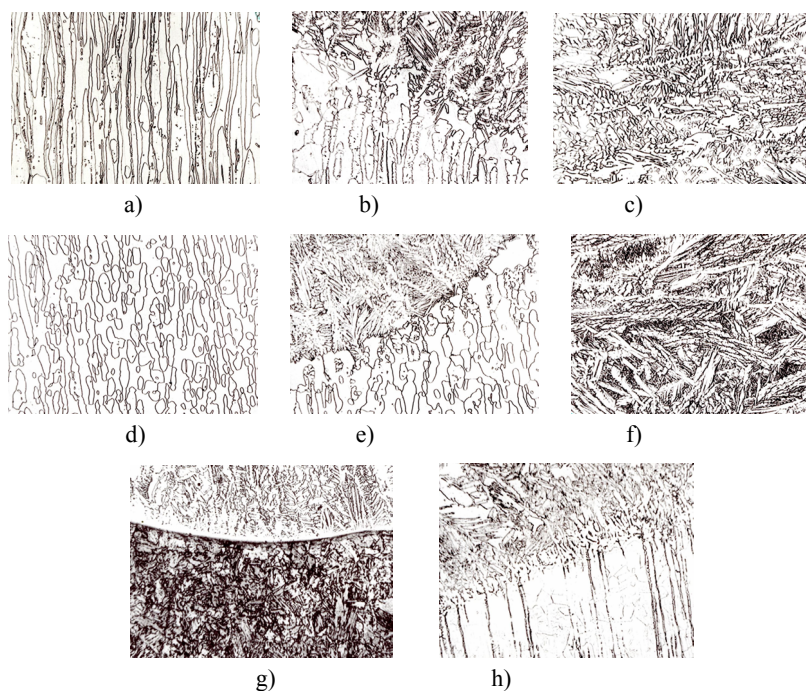


Rys. 4. Krzywe twardości w poszczególnych strefach złącza ze stali 1.4462 i P295GH



Rys. 5. Krzywe twardości w poszczególnych strefach złącza ze stali 1.4162 i 1.4404

Złącze spawane tylko z pozoru jest połączeniem jednorodnym, w rzeczywistości jego struktura jest lokalnie zróżnicowana, co nie jest bez znaczenia w procesie projektowania złącza spawanego. W zależności od wielkości energii liniowej udział fazy ferrytycznej do austenitycznej zmienia się proporcjonalnie do jej wartości, ale tylko w pewnym zakresie wielkości. Badania doświadczalne wykazują, że w każdej strefie złącza spawanego występuje zróżnicowanie strukturalne, zależne od prędkości chłodzenia poszczególnych stref (rys. 6).

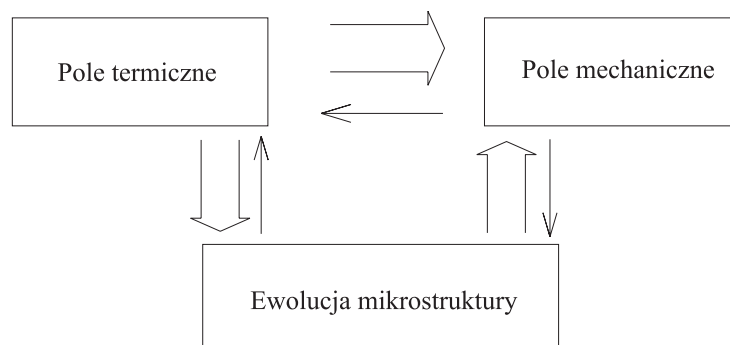


Rys. 6. Strefy złącza spawanych dla różnych kombinacji materiałowych a) MR – 1.4162, b) SWC – 1.4162, c) MS – 1.4162, d) MR – 1.4462, e) SWC – 1.4462, f) MS 1.4462, g) SWC – 1.4462+P295GH, h) SWC – 1.4162+1.4404

Większa prędkość chłodzenia sprzyja powstawaniu struktury austenityczno-ferrytycznej z przewagą ferrytu, co nie pozostaje bez znaczenia dla własności eksploatacyjnych złącza. Faza ferrytyczna znacząco obniża udarność stali, jak i jej wytrzymałość na rozciąganie [5, 6].

Ważnym czynnikiem jest wytrzymanie przez odpowiednio długi czas w odpowiedniej temperaturze ferrytu, co zwiększy udział procentowy austenitu i pozytywnie wpłynie na własności złącza [6].

Obliczeniowa mechanika pękania rozszerza możliwości analizy temperatury, naprężeń i odkształceń wraz ze zmianami mikrostruktury w procesie spawania. Obejmuje zatem relację złożoną o sprzężeniu zwrotnym, co w sensie fizycznym prowadzi do ustalenia związku pomiędzy modułami: polem termicznym, ewolucją mikrostruktury; polem mechanicznym o wzajemnym oddziaływaniu synergicznym (rys. 7) [11].



Rys. 7. Sprzężone oddziaływanie cieplno-mechaniczne w procesie spajania

3. PODSUMOWANIE

Mikrostruktura strefy wpływu ciepła ma decydujący wpływ na właściwości mechaniczne złączy spawanych oraz ich odporność korozyjną. Na jej złożony charakter mają wpływ takie czynniki, jak: skład chemiczny materiału rodzimego, maksymalna temperatura spawalniczego cyklu cieplnego, szybkość stygnięcia oraz charakter kolejnych cykli cieplnych [8].

Zmienna zawartość ferrytu do austenitu w stalach „DUPLEX” powoduje zmianę właściwości mechanicznych złącza spawanego. Nieciągłości strukturalne tego typu generują w spoinie, w strefie wpływu ciepła i materiale rodzimym naprężenia spawalnicze, które mogą być przyczyną powstawania pęknięć.

Po to, aby otrzymać złącze spawane ze stali austenityczno-ferrytycznych typu „DUPLEX” o optymalnych własnościach wytrzymałościowych i korozyjnych, niezbędne jest przestrzeganie podstawowych parametrów technologicznych procesu. Energia liniowa jest podstawowym parametrem wpływającym na strukturę złącza, jego twardość i wytrzymałość, a tym samym decydującym czynnikiem stanowiącym o jego jakości.

Dla zapewnienia optymalnych własności eksploatacyjnych złącza należy ustalić minimalną energię liniową przy danej grubości materiału, która zapewni odpowiednie warunki do wytworzenia się wystarczającej ilości austenitu w strefie wpływu ciepła.

LITERATURA

- [1] Amman T., 2008. Spawanie łukowe w osłonie gazowej stali austenityczno-ferrytycznych. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 5.
- [2] Brózda J., Łomozik M., 2002. Spawanie stali nierdzewnych o strukturze dwufazowej (duplex). Własności złączy spawanych. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 2.
- [3] Ciechacki K., 2005. Badania właściwości mechanicznych wybranych połączeń spajanych z lokalnym źródłowaniem cech mechanicznych. Praca Doktorska – ATR Bydgoszcz.
- [4] Dzioba I., 2006. Analiza wytrzymałości elementów spawanych, zawierających pęknięcia, z wykorzystaniem procedury SINTAP/FITNET. Przegląd Mechanika 12.

- [5] John J., Dunn and David S., Bergstrom., 2003. Development of new “lean” duplex stainless steel, AL2003 Alloy (UNS S32003). *Stainless Steel World*, December.
- [6] Kensik R., 2006. Ocena energii liniowej w procesach MIG/MAG. *Przegląd Spawalnictwa* 9-10.
- [7] Kwalifikowanie technologii spawania metali – Spawanie łukowe i gazowe stali oraz spawanie łukowe niklu i stopów niklu EN ISO 15614-1:2008.
- [8] Łukojć A., Nowacki J., 2004. Przemiany SWC podczas spawania stali duplex. *Przegląd Spawalnictwa* 4.
- [9] Przetakiewicz W., Kozak R., 1995. Niektóre aspekty spawalności ferrytyczno-austenicznych stali typu duplex i superduplex. *Przegląd Spawalnictwa* 3.
- [10] Ranatowski E., 1999. Elementy fizyki spajania metali. Wyd. Uczeln. ATR w Bydgoszczy.
- [11] Ranatowski E., 2007. Relacja struktura – odporność na pękanie w procesie oceny spawalności stali niskostopowych. XI Krajowa konferencja mechaniki pękania.
- [12] Ranatowski E., 2008. Obliczeniowa mechanika spawania – narzędzie współczesnego spawalnictwa. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa* 5.

INFLUENCE OF SELECTED TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF “DUPLEX” STEEL WELDS

Summary

Over the recent years a frequently applied material, slowly eliminating austenitic steels common in chemical apparatus construction, have been “DUPLEX” type austenitic-ferrite steels; much cheaper, containing less nickel, demonstrating good chemical resistance and mechanical properties. Steel weldability considerably depends on the austenitic-ferrite structure. Welds made compliant with PN EN ISO 15614, although meeting technical standards, often differ in their structure and properties. This paper provides a closer look at the “DUPLEX” steel weldability with technological parameters process analysis.

Keywords: DUPLEX, welding, linear energy, hardness