

Daniel Medaj, Andrzej Skibicki ¹⁾

WYBRANE ASPEKTY TECHNOLOGICZNE SPAWANIA STALI DWUFAZOWYCH ODPORNICH NA KOROZJĘ

Streszczenie: Artykuł opisuje problematykę spawalności stali dwufazowych w aspekcie spawania FCAW w odniesieniu do normy PN EN 15614-1. Połączenia wykonane zostały w różnych kombinacjach materiałowych, zarówno dupleksu z dupleksem jak i dupleksu ze stalami węglowymi i kwasoodpornymi stalami austenitycznymi. Przeprowadzono próbę zginania, rozciągania statycznego złączy spawanych, badanie twardości i udarności, badanie na zawartość ferrytu oraz badania radiologiczne (RT). Próbki wykonano dla pozycji wprowadzającej dużą ilość ciepła, jak również były one spawane małą energią liniową. Niniejsze badania mają na celu ustalenie optymalnych rozwiązań technologicznych spawania uwzględniając energię liniową przy jednoczesnej minimalizacji kosztów z wykorzystaniem metod numerycznych.

Słowa kluczowe: kwalifikowanie technologii spawania, energia liniowa, modelowanie procesów.

SPAWANIE STALI DUPELEKS

Stale austenityczno-ferrytyczne coraz częściej są wykorzystywane w przemyśle zastępując tym samym droższe stale austenityczne. Mimo, że stopy te znane są już od początku dwudziestego wieku, dopiero w ostatnich latach weszły one do użycia na większą skalę. Do wykonywania połączeń spawanych wykorzystuje się z powodzeniem większość dostępnych na rynku metod. Poniższe badania dotyczą złączy spawanych wykonanych drutem proszkowym zgodnie z normą na kwalifikowanie technologii spawania.

Decydującą rolę w procesie spawania stali austenityczno-ferrytycznych typu dupleks na heterogeniczność oraz strukturę stali ma energia liniowa. Od ilości wprowadzonego ciepła zależy zarówno morfologia, odporność na działanie agresywnych mediów jak i parametry wytrzymałościowe złącza [1, 3].

Inżynierowie sceptycznie podchodzą do opracowywania technologii na powyższe materiały, w obawie, że nie będą w stanie w pełni kontrolować procesu technologicznego spawania w warunkach produkcyjnych.

Podstawy wyznaczania energii liniowej wykorzystywane w inżynierii znacznie odbiegają od rzeczywistej jej wartości, co nie jest wystarczające przy coraz bardziej zwiększającym się asortymencie materiałów o coraz bardziej skomplikowanym składzie chemicznym. Chociaż norma, według której wykonywane jest

¹ Instytut Technik Wytwarzania. Zakład Inżynierii Materiałowej. Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy.

kwalfikowanie technologii spawania, jest dokumentem prawnym określającym zasady przeprowadzania kwalifikowania, trzeba wziąć pod uwagę, że pojęcie energii liniowej zostało tam praktycznie pominięte, a jest to ważny parametr, szczególnie dla tak wrażliwych materiałów jak dupleks czy stopy tytanu [3].

Podstawową wartość energii liniowej określa się z powszechnie stosowanego wzoru (1), nie uwzględnia on jednak wielu czynników wpływających na ilość wprowadzonego ciepła, a tym samym daje rozrzut wartości dochodzący nawet do 30%. Rzeczywista energia liniowa to nie tylko natężenie, napięcie i prędkość spawania, ale również wszystkie czynniki związane bezpośrednio z wykonywanym złączem takie jak:

- materiały wykorzystywane do procesu wykonywania złącza,
- sposób wprowadzania ciepła ze wszystkimi aspektami mechaniki spajania,
- warunki, w jakich przebiega cały proces [2].

$$E = \frac{U_s I_s}{v_s} \eta_s \quad (1)$$

gdzie:

- E – energia liniowa [J/m],
- U_s – napięcie prądu spawania [V],
- I_s – natężenie prądu spawania [A],
- V_s – prędkość spawania [m/s],
- η_s – sprawność spawania [-].

SPAWANIE ZŁĄCZY PRÓBNYCH

Badania przeprowadzono zgodnie z normą na kwalifikowanie technologii spawania PN EN 15614-1. Poszczególne złącza spawane były w ten sposób, aby wprowadzić w obszar spoiny zarówno niewielką ilość ciepła (pozycja PC) jak i z dużą energią liniową (pozycja PF). Materiałem dodatkowym użytym do spawania był drut rdzeniowy AVESTA FCW 2D LDX 2101 oraz AVESTA FCW 2D 2205. Próbkę spawaną były w osłonie mieszaniny argonu i dwutlenku węgla. Materiałem bazowym były płyty o wymiarach 300x125mm i grubości od 8÷15mm z dupleksu LDX 2101, 2205, stali kotłowej P295GH i kwasoodpornej stali austenitycznej 1.4404 o określonych właściwościach mechanicznych, zamieszczonych w tabeli 1.

Po przeprowadzeniu badań nieniszczących (wizualnych - VT, penetracyjnych - PT, radiograficznych – RT), próbki poddano badaniu makroskopowemu, mikroskopowemu oraz na zawartość ferrytu. Badania nie wykazały żadnych wad zewnętrznych ani wewnętrznych, sklasyfikowano je w poziomie jakości B według normy PN EN ISO 5817.

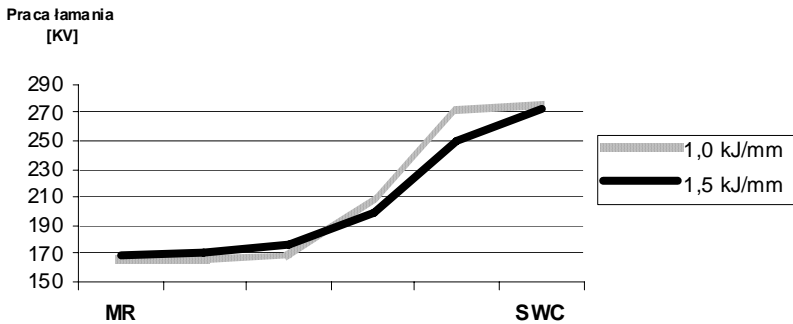
Poszczególne złącza przygotowane zostały w ten sposób, aby zapewniały najlepsze wykorzystanie technologiczne w aspekcie kwalifikowania technologii spawania (tabela 1).

Tabela 1. Właściwości materiałów użytych do wykonania złączy próbnych

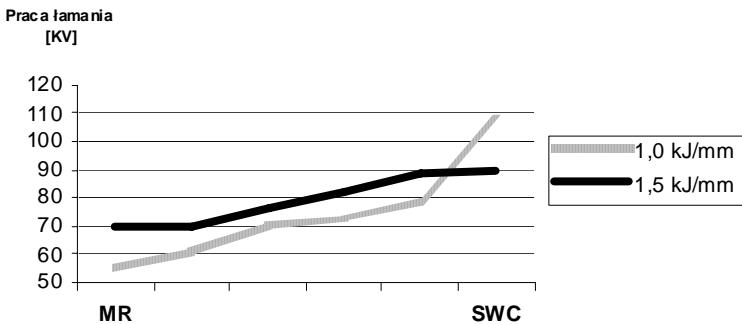
	Materiał rodzimy				Stopiwo	
	1.4162	1.4462	1.4404	P295GH	Avesta LDX 2101	Avesta 2205
Re [MPa]	540	570	346	400	600	640
RM [MPa]	730	800	582	509	770	820
A5 [%]	42	37	41	30	25	24

BADANIA ZŁĄCZY PRÓBNYCH

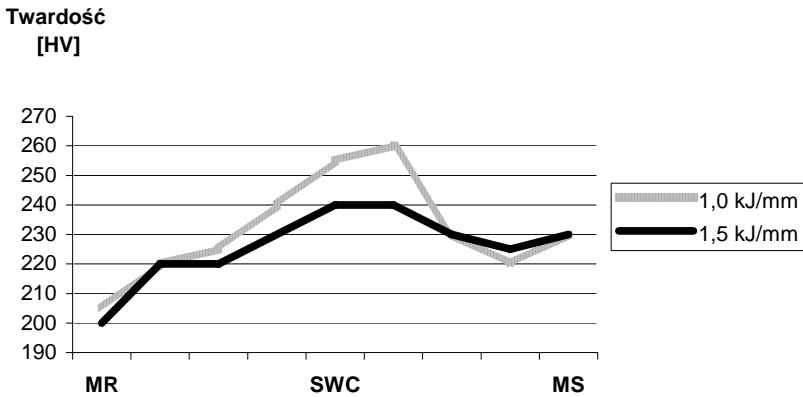
Na wykonanych uprzednio złączach zostały wykonane badania nieniszczące, wizualne penetracyjne oraz radiograficzne, a po pozytywnej weryfikacji przeprowadzono badania niszczące. Do znaczących przemian strukturalnych w złączu spawanym zachodzi w strefie wpływu ciepła. Zmienna jest zawartość austenitu i ferrytu w zależności od grubości złącza, a tym samym czasu jego chłodzenia, przez co ulegają zmianie właściwości mechaniczne.



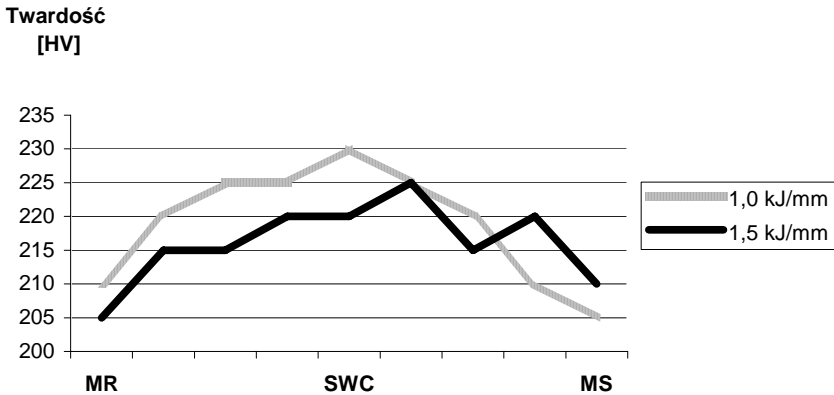
Rys. 1. Krzywe udarności dla materiału 1.4462



Rys. 2. Krzywe udarności dla materiału 1.4162



Rys. 3. Twardość w poszczególnych strefach złącza spawanego dla materiału 1.4462



Rys. 4. Twardość w poszczególnych strefach złącza spawanego dla materiału 1.4162

Z zamieszczonych wykresów wynika, że w zależności od wielkości energii liniowej zmienia się twardość materiału przy jednoczesnym wzroście pracy łamania. Jednocześnie wzrost energii liniowej powoduje zmniejszenie twardości w strefie wpływu ciepła, zbliżając się do twardości materiału rodzimego i zmniejszając zjawisko karbu strukturalnego (rys. 1 - 4). Sytuacja ma się analogicznie do spawania dupleksu z pozostałymi materiałami.

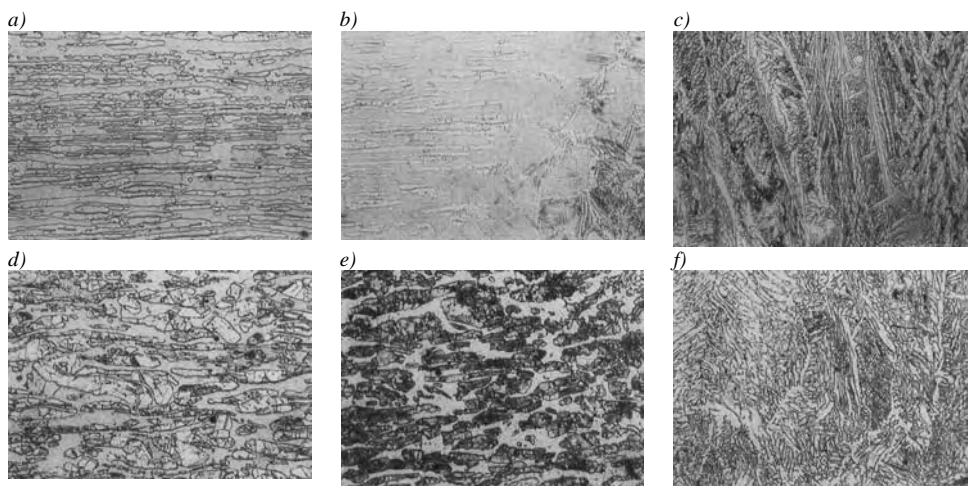
HETEROGENICZNOŚĆ STALI DUPLEKS

Zmienny rozkład austenitu i ferrytu w stalach austenityczno-ferrytycznych typu dupleks, morfologia i wielkość ziaren ferrytu i austenitu oraz rodzaj, rozkład węglików, azotków i szeregu faz międzymetalicznych, których wpływ na właściwości SWC jest najczęściej niekorzystny, wpływa na zróżnicowanie właściwości

mechanicznych poszczególnych obszarów złącza spawanych w zależności od zmieniających się parametrów ekstensywnych i intensywnych podczas wykonywania złącza. Dlatego wykonanie badań niszczących jest niezbędne dla określenia prawidłowego przebiegu procesu technologicznego [3, 5].

Tabela 2. Średnia zawartość ferrytu w złączach spawanych

Lp.	Energia liniowa [kJ/mm]	Materiał złącza	Średnia zawartość ferrytu
1.	1,0	1.4462+1.4404	38,7
	1,5		39,1
2.	1,0	1.4462+1.4462	35,9
	1,5		39,1
3.	1,0	1.4162+1.4162	34,5
	1,5		36,7
4.	1,0	1.4162+1.4162	34,5
	1,5		36,7
5.	1,0	1.4162+P295GH	31,3
	1,5		34,2



Rys. 5. Mikrostruktura poszczególnych stref złącza spawanych: a) MR – 1.4462, b) SWC – 1.4462, c) MS – 1.4462, d) MR - 1.4162, e) SWC – 1.4162, f) MS 1.4162

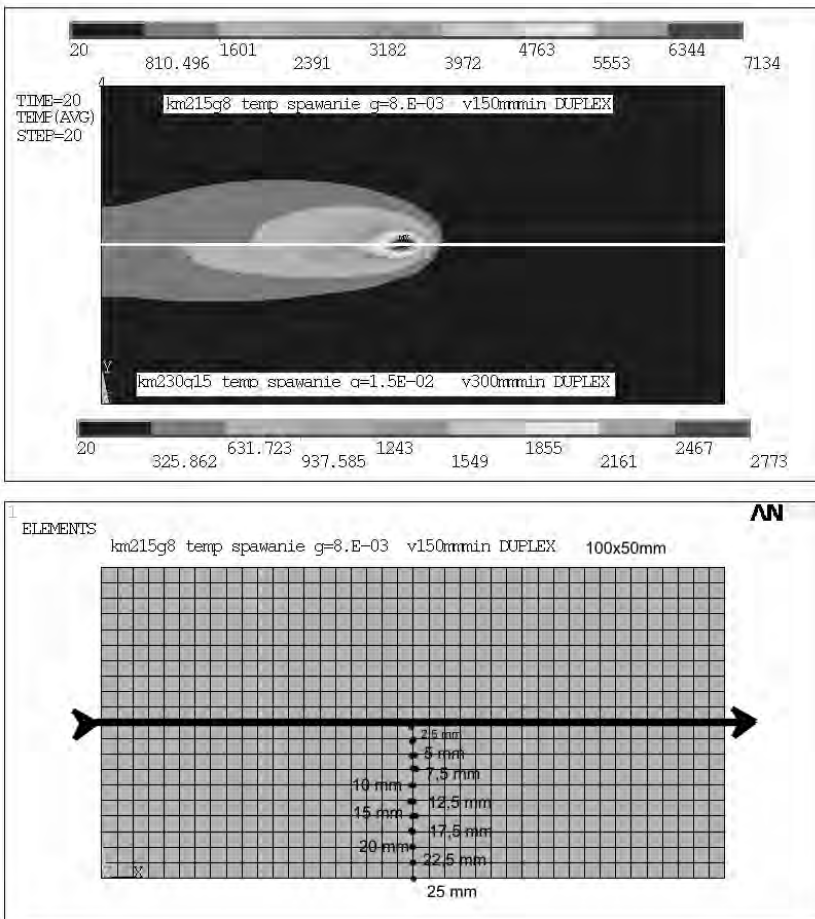
Ilość wprowadzonego ciepła ma wpływ na procentową zawartość ferrytu i austenitu. Złącze próbne spawane energią liniową na poziomie 1,0 kJ/mm charakteryzuje się mniejszą zawartością ferrytu niż te same złącza wykonane energią liniową wynoszącą 1,5kJ/mm (co pokazuje tabela 2). Badania mikroskopowe nie wykazały wydzielenia typu azotki oraz fazy sigma (rys. 5).

MODELOWANIE PROCESU

Projektowanie technologii zgodnie z obowiązującymi normami jest pracochłonne, kosztowne oraz mało dokładne, ponieważ odnosi się do jednego przy-

padku, który może być traktowany w szerokim spektrum zastosowania zgodnie z normą na kwalifikowanie technologii spawania. Niewątpliwie lepszym rozwiązaniem byłoby modelowanie procesu w celu minimalizacji kosztów, które są generowane przez kosztowne próby spawania oraz możliwość korekty parametrów technologicznych dla indywidualnych przypadków. Istnieją sprawdzone przypadki zastosowania metody elementów skończonych do wyznaczania wynikających ze spawania temperatur, szybkości chłodzenia, odkształceń i naprężeń [4]. Na poniższym przykładzie przedstawiono symulacje procesu spawania analogicznie jak dla powyższych przykładów opracowanych zgodnie z normą PN EN 15614-1 (rys. 6).

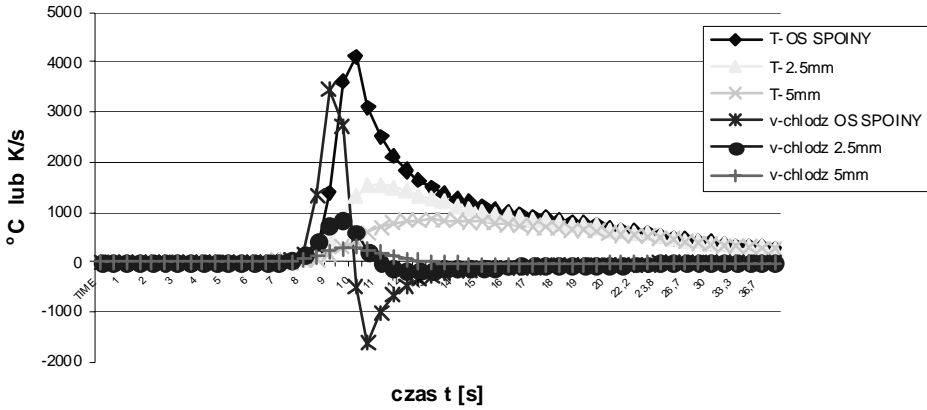
Analizę numeryczną przeprowadzono dla sześciu przypadków, obejmujących trzy grubości elementów spawanych - 8, 10 i 15mm oraz dwie prędkości spawania - 150 i 300mm/min.



Rys. 6. Porównanie izoterm dla dwóch przypadków różnej prędkości spawania i grubości (a) oraz sieć elementów z zaznaczonymi miejscami kontroli temperatury (b)

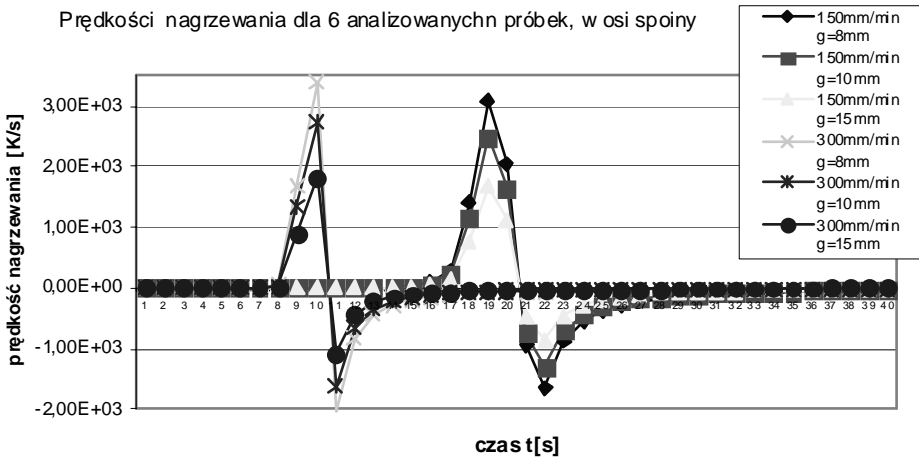
Modelowanie pola termicznego metodą elementów skończonych oraz wyznaczenie prędkości chłodzenia daje możliwość projektowania procentowego rozkładu austenitu i ferrytu w strefie wpływu ciepła. W połączeniu z wykresem rozpadu austenitu umożliwia w dalszym postępowaniu ustalenie żądanych własności mechanicznych złącza spawanego.

Temperatura i szybkość nagrzewania

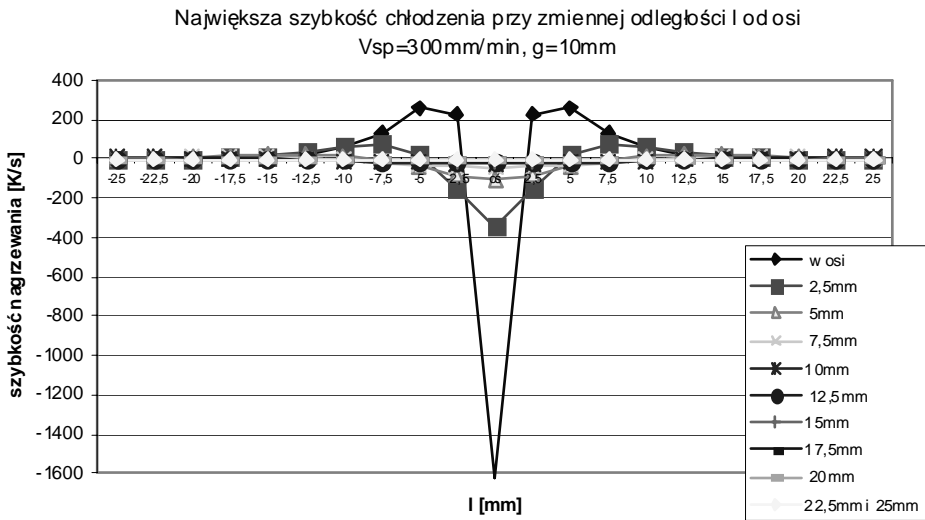


Rys. 7. Zmiana temperatury dla czterech punktów dla $V_{spaw}=300\text{mm/min}$, $g=10\text{mm}$

Energia liniowa oraz grubość materiału wpływa na czas chłodzenia i nagrzewania w poszczególnych obszarach strefy wpływu ciepła (rys. 7). Daje nam to możliwość optymalnego doboru parametrów spawania dla indywidualnego złącza próbnego.



Rys. 8. Szybkość chłodzenia dla wszystkich próbek, w osi spoiny



Rys. 9. Wykres prędkości chłodzenia w momentach, gdy w danym punkcie osiągała ona maksimum

W zależności od grubości materiału w miarę oddalania się od jeziorka spawalniczego prędkość odprowadzania ciepła jest znacząco niższa, 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 (rys. 8 i rys. 9).

PODSUMOWANIE

Możliwość wcześniejszego modelowania procesu przyczyniłaby się do ustalenia optymalnej energii liniowej poprawiając właściwości wytrzymałościowe i korozyjne złączy. W każdym przypadku zależą one od karbu strukturalnego, spowodowanego różnicami morfologicznymi i strukturalnymi w poszczególnych strefach złącza spawanego, a których nie można optymalizować przy użyciu tradycyjnego kwalifikowania technologii spawania.

Badania doświadczalne w połączeniu z metodami numerycznymi umożliwiają projektowanie konstrukcji o optymalnych właściwościach użytkowych i wytrzymałościowych. Badaniom numerycznym można poddać materiały i procesy aktualnie niedostępne lub nawet hipotetyczne.

PIŚMIENNICTWO

1. Dunn J. J., Bergstrom D. S.: Development of new “lean” duplex stainless steel, AL2003 Alloy (UNS S32003). Stainless Steel World, December 2003.

2. Kudła K., Wojsyk K.: Normowana energia liniowa a ilość ciepła wprowadzanego podczas spawania. Przegląd Spawalnictwa nr 12/2010.
3. Nowacki J.: Stal duplex i jej własności. WNT, Warszawa 2009.
4. Skibicki A.: Identyfikacja stanu termicznych i mechanicznych skutków procesu spawania wybranych elementów z uwzględnieniem metod numerycznych. Praca doktorska, Bydgoszcz 1998.
5. Ranatowski E.: Obliczeniowa mechanika spawania – podstawy fizyczne procesu. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy. Bydgoszcz 2009.

SELECTED TECHNOLOGICAL ASPECTS OF UNCORRODIBLE TWO-PHASE STEEL WELDING

Summary:

This article describes the problem of welding of two-phase steel in the aspect of FCAW welding with reference to norm PN EN 15614-1. The joints were done in different combinations of material, both duplex with duplex, and duplex with carbon steel and stainless austenitic steel. There were conducted: a bending test, a static stretching test of the weld joints, hardness and impact resistance tests, a ferrite test as well as X-ray. The samples were welded using both a large amount of heat and a low heat input energy.

The aim of this research is to establish the optimal technological solutions for welding, taking into account heat input energy while minimizing the costs and using numerical methods.

Keywords: specification and qualification of welding procedures for metallic materials, heat input energy, modeling process.