

Tomasz Węgrzyn

Wyższa Szkoła Zarządzania Ochroną Pracy w Katowicach

Damian Hadryś

Politechnika Śląska, Wydział Transportu

Michał Miros

Politechnika Śląska, Wydział Transportu

Wpływ pierwiastków stopowych na właściwości mechaniczne stopiwa

Streszczenie

Na bezpieczeństwo stalowych konstrukcji ma duży wpływ odpowiedni dobór materiałów pod kątem nośności granicznej. Bezpieczeństwo stalowych konstrukcji zależy od wielu ważnych czynników, takich jak rodzaj stali, sposób wykonywania połączeń spawanych, warunki eksploatacyjne, temperatura. Dla zapewnienia prawidłowych własności eksploatacyjnych konstrukcji niezwykle ważny jest prawidłowy dobór stali i odpowiedniej metody spawania. Dla najbardziej odpowiedzialnych konstrukcji stalowych ważny jest prawidłowy dobór składu chemicznego zarówno stali, jak i spawanych złączy. W spawanych konstrukcjach stalowych dodawany jest często do stali mangan, nikiel i molibden, ograniczany jest natomiast chrom i wanad, natomiast zawartość węgla w stali często nie przekracza 0,12%. Te same pierwiastki, które w stalach specjalnych mogą być składnikami podstawowymi, w stalach o zwiększonej wytrzymałości mogą być szkodliwe (jak omawiany chrom i wanad). W prezentowanym artykule analizowany jest wpływ najważniejszych pierwiastków stopowych takich jak Mn, Ni, Mo, Cr, V na własności i strukturę stalowego stopiwa wykonanego elektrodami otulonymi.

Słowa kluczowe: *bezpieczeństwo konstrukcji stalowych, skład stopiwa*

Abstract

Exploitation conditions of steel structure depend on kind of steel, their welds, state of stress and temperature. Because of that very important is good selection of steel and welding method for proper steel structure. For responsible steel structure are used low carbon and low alloy steel, very often with small amount of carbon, below 0.12%, and the amount of alloy elements such as Ni, Mn, Mo, Cr and V are rarely applied both in low alloy steel and their welds. In the terms of the kind of steel it is used a proper welding method and adequate filler materials. In the present paper it was tested the influence of Ni, Mo, Cr, V in MWD on the behaviour of steel structure for low temperature service.

Keywords: *Safety of steel construction, metal weld deposit*

1. Wprowadzenie i cel badań

Na bezpieczeństwo stalowych konstrukcji ma duży wpływ odpowiedni dobór materiałów pod kątem nośności granicznej [1]. Na odpowiedzialne konstrukcje są stosowane coraz częściej stale o podwyższonej wytrzymałości, by równocześnie zapewnić im mniejszą masę i dobre własności mechaniczne [2, 3]. Stale te nie stwarzają większych trudności przy spawaniu. Konstrukcje z tych stali spawa się różnymi metodami: elektrodami otulonymi, łukiem krytym, metodą TIG, MIG, MAG. Od materiałów konstrukcyjnych wymaga się, by były wytrzymałe i równocześnie posiadały dobre własności plastyczne [2, 3, 4, 5]. Wg CEN (norm europejskich) wymaga się, by udarność spoin w ważnych konstrukcjach wynosiła 47 J w temperaturze 0°C, a w najbardziej odpowiedzialnych nawet 60 J w temp. -60°C. Pomimo coraz to nowych osiągnięć naukowych, coraz bardziej zaawansowanych technologii i coraz lepszych i nowocześniejszych materiałów zdarzają się wciąż wady i awarie konstrukcyjne. Bezpieczeństwo stalowych konstrukcji zależy od wielu ważnych czynników, takich jak prawidłowe obliczenia konstruktorów, dobór stali, sposób wykonywania połączeń spawanych, warunki eksploatacyjne, temperatura [3, 5, 6, 7]. Dla zapewnienia prawidłowych własności eksploatacyjnych konstrukcji niezwykle ważny jest prawidłowy dobór stali i odpowiedniej metody spawania. Obecnie oczywisty jest pogląd, że bardzo ważny jest prawidłowy dobór odpowiednich gatunków stali, materiałów spawalniczych i metod spawania [2, 8, 9]. Dla uniknięcia wad konstrukcyjnych i awarii budowlanych należy z większą uwagą dobierać stal na konstrukcje i materiały spawalnicze. Należy ograniczać dodatki stopowe pogarszające własności eksploatacyjne spawanych połączeń i równocześnie wprowadzać pierwiastki poprawiające własności plastyczne zwłaszcza w ujemnych temperaturach. Celem badań jest przeanalizowanie wpływu podstawowych dodatków stopowych na własności i strukturę stalowego stopiwa wykonanego elektrodami otulonymi.

2. Część doświadczalna

Przeanalizowano wpływ pierwiastków stopowych w stopiwie wykonanym elektrodami otulonymi. Dodatkowo przeanalizowano dobór różnych gazów ochronnych stosowanych do spawania stali metodami MIG/MAG. Węgiel, mangan, krzem, nikiel, molibden, chrom, wanad są uważane za najważniejsze pierwiastki oddziałujące na własności plastyczne spawanych połączeń, zwłaszcza w ujemnych temperaturach. Jakkolwiek różny jest wpływ tych pierwiastków na własności plastyczne spoin i eksploatacyjne spawanych połączeń. Wpływ

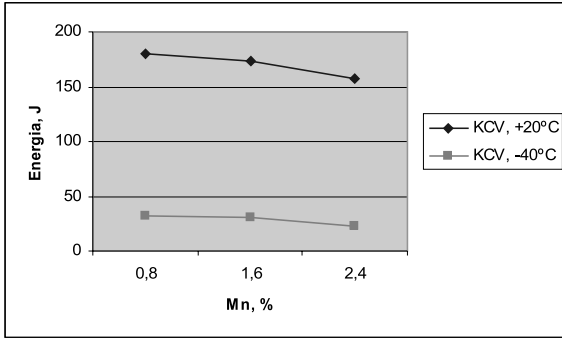
różnej zawartości manganu, niklu, molibdenu, chromu i wanadu na własności i strukturę stalowego stopiwa został szczegółowo przeanalizowany. Wykonano doświadczalne zasadowe stalowe elektrody niskostopowe zawierające w otulinach dodatkowo proszek żelaza. Stopiwo o zmiennej zawartości manganu, niklu, molibdenu, chromu, wanadu i azotu otrzymywano poprzez oddzielne wprowadzanie różnych żelazostopów (żelazomangan, żelazonikiel, żelazochrom, żelazowanad, żelazomolibden) zamiast proszku żelaza. Wprowadzając oddzielnie różne żelazostopy w miejsce proszku żelaza, otrzymywano stopiwo o zróżnicowanym składzie chemicznym. Do wykonania elektrod zastosowano druty elektrodowe o zawartości azotu: w granicach 80 ppm. Do spawania stosowano elektrody o średnicy 4 mm. Spawano prądem stałym o natężeniu ok. 180 A, łącząc elektrody do bieguna dodatniego. Stopiwo wykonano i badano zgodnie z polską normą PN-64/N-69708. Ze stopiwa wykonano próbki do badań strukturalnych i próbki udarowości. Przeprowadzono po 5 pomiarów udarowości dla każdego stopiwa, głównie w temperaturze: +20°C i -40°C. Skład chemiczny podstawowego stopiwa (bez dodatkowego wprowadzania żelazostopów do otulin elektrod) przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Skład chemiczny typowego stopiwa

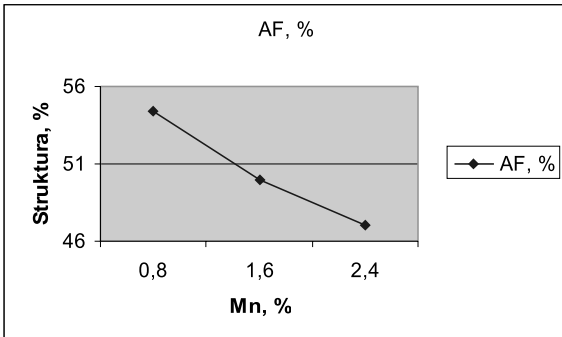
Pierwiastek stopowy	Zawartość
C	0,06 ÷ 0,08%
P	0,019 ÷ 0,023%
Al	około 0,07%
O	około 350 ppm
N	około 80 ppm
Si	0,30 ÷ 0,40%
S	0,020 ÷ 0,023%
Ti	około 0,01%
Mn	0,8%

Analizowane pierwiastki stopowe wprowadzano oddzielnie do podstawowego składu stopiwa poprzez zastępowanie proszku żelaza w otulinach eksperymentalnych elektrod odpowiednimi żelazostopami. Pierwszym z badanych w ten sposób pierwiastków stopowych był mangan. Wprowadzając do otuliny żelazomangan w miejsce sproszkowanego żelaza, uzyskano stopiwo o zróżnicowanej zawartości manganu. Zależność pomiędzy energią łamania stopiwa wyjściowego o najmniejszej zawartości manganu (0,8% Mn) oraz podwyższonej zawartości (1,6% Mn

i 2,4% Mn) manganu, w temperaturze: +20°C i -40°C, przedstawiono na rysunku 1. Zależność pomiędzy strukturą metalograficzną stopiwa o zróżnicowanej zawartości manganu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 1. Energia łamania stopiwa o zmiennej zawartości manganu.



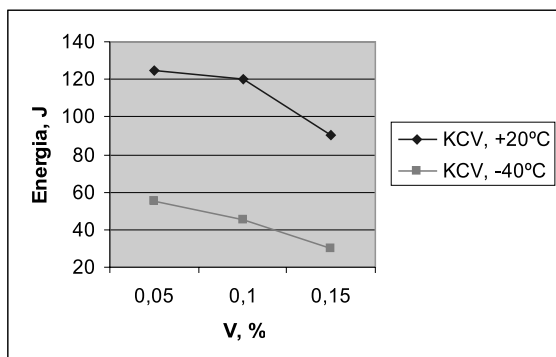
Rys. 2. Zależność pomiędzy zawartością manganu w stopiwie a zawartością ferrytu AF.

Podstawową strukturą był drobnoziarnisty ferryt AF (*acicular ferrite*) i jego zawartość w stopiwie wynosiła około 50%. Zawartość pozostałych pierwiastków stopowych w stopiwie zasadowych elektrod zmieniała się w sposób przedstawiony w tab. 2.

Tab. 2. Zmiany zawartości pierwiastków stopowych w stopiwie elektrod zasadowych

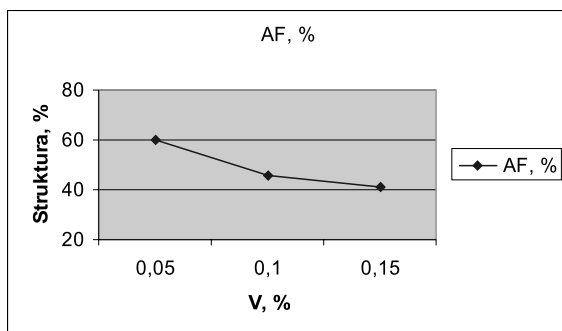
Pierwiastek stopowy	Zmiany
Ni	1 ÷ 3%
Mo	0,2 ÷ 0,6%
Cr	0,2 ÷ 0,6%
V	0,05 ÷ 0,15%

Zależność pomiędzy zawartością wanadu w stopiwie a jego strukturą metalograficzną i własnościami plastycznymi stopiwa przedstawiono na rysunkach 3 i 4.



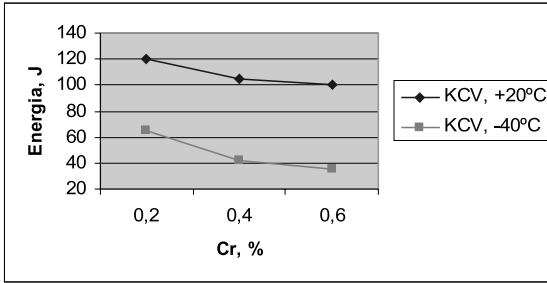
Rys. 3. Energia łamania stopiwa o zmiennej zawartości wanadu.

Podobnie jak w poprzednio badanym stopiwie podstawową strukturą był

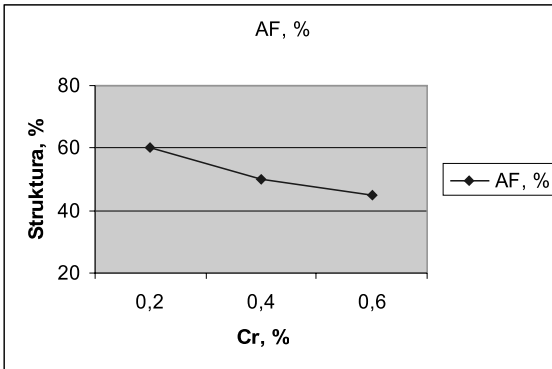


Rys. 4. Zależność pomiędzy zawartością wanadu w stopiwie a zawartością ferrytu AF.

drobnoziarnisty ferryt AF, jednak jego zawartość w stopiwie wyraźniej zależy od zawartości wanadu niż manganu i zmienia się od 60% (dla stopiwa zawierającego 0,05% V) do 40% (dla stopiwa zawierającego 0,15% V). Dodatkowo przeanalizowano obecność tzw. faz MAC (termin coraz częściej spotykany w literaturze dla łącznego zestawienia martenzytu, austenitu szczątkowego, węglików). Fazy te występowały w dużej ilości od 10% (dla stopiwa zawierającego 0,05% V) do 20% (dla stopiwa zawierającego 0,15% V). Wysoka zawartość faz MAC i stosunkowo niska zawartość ferrytu AF ma zasadniczy wpływ na niską udarność stopiwa w ujemnych temperaturach. Wpływ zawartości chromu w stopiwie zasadowych elektrod na własności plastyczne stopiwa i jego strukturę przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

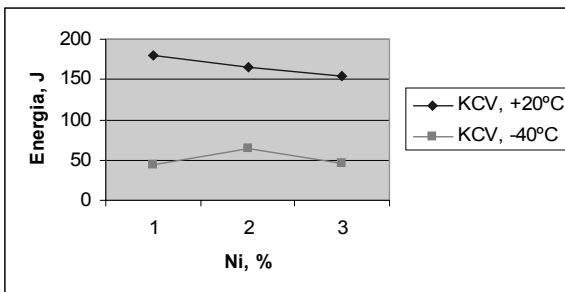


Rys. 5. Energia łamańcza stopiwa o zmiennej zawartości chromu.

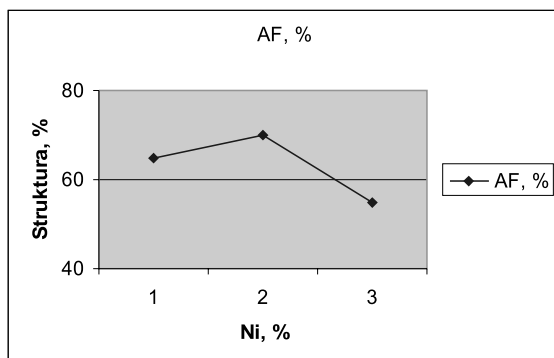


Rys. 6. Zależność pomiędzy zawartością chromu w stopiwie a zawartością ferrytu AF.

Tak jak w poprzednio badanym stopiwie wanadowym podstawową strukturą był drobnoziarnisty ferryt AF i podobnie jego zawartość w stopiwie silnie zależy od zawartości chromu i zmienia się od 60% (dla stopiwa zawierającego 0,2% Cr) do 45% (dla stopiwa zawierającego 0,6% Cr). Fazy MAC występowały także w dużej ilości, od 8% (dla stopiwa zawierającego 0,2% Cr) do 17% (dla stopiwa zawierającego 0,6% Cr). Wysoka zawartość faz MAC i stosunkowo niska zawartość ferrytu AF ma zasadniczy wpływ na niską udarność stopiwa w ujemnych temperaturach. Wpływ zawartości niklu w stopiwie zasadowych elektrod na własności plastyczne stopiwa i jego strukturę przedstawiono na rysunkach 7 i 8.

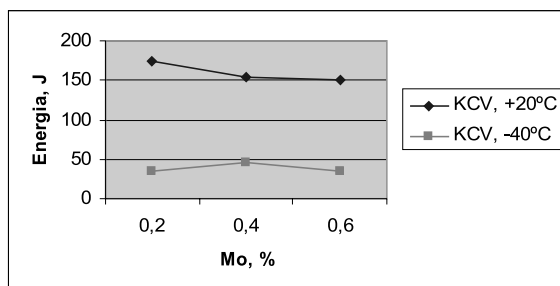


Rys. 7. Energia łamańcza stopiwa o zmiennej zawartości niklu.

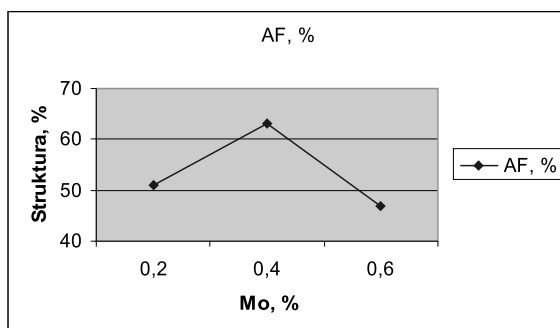


Rys. 8. Zależność pomiędzy zawartością niklu w stopiwie, a zawartością ferrytu AF.

W stopiwie niklowym podstawową strukturą był drobnoziarnisty ferryt AF i jego zawartość w stopiwie była bardzo wysoka i dochodziła do 70% (dla stopiwa zawierającego 2% Ni). Niska zawartość faz MAC (ok. 3%) i wysoka zawartość ferrytu AF ma korzystny wpływ na wysoką udurowość stopiwa w ujemnych temperaturach. Wpływ zawartości molibdenu w stopiwie zasadowych elektrod na własności plastyczne stopiwa i jego strukturę przedstawiono na rysunkach 9 i 10.



Rys. 9. Energia łamania stopiwa o zmiennej zawartości molibdenu.



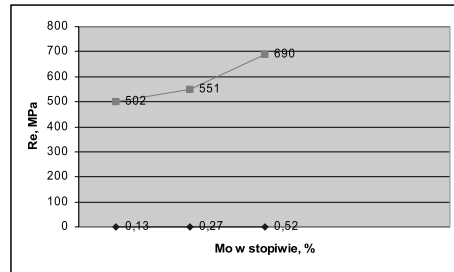
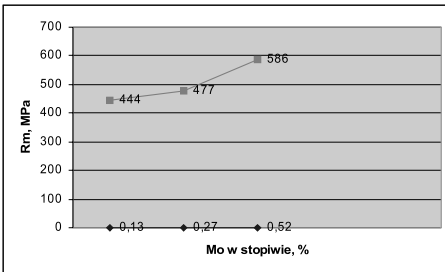
Rys. 10. Zależność pomiędzy zawartością molibdenu w stopiwie, a zawartością ferrytu AF.

W stopiwie molibdenowym podstawową strukturą był drobnoziarnisty ferryt AF i jego zawartość w stopiwie była wysoka i dochodziła do 64% (dla stopiwa zawierającego 0,4% Mo). Podobnie jak w stopiwie niklowym fazy MAC występowały w ograniczonej ilości, poniżej 3%. Niska zawartość faz MAC i wysoka zawartość ferrytu AF ma korzystny wpływ na wysoką udarność stopiwa w ujemnych temperaturach. Struktury metalograficzne badanych stopiów różniły się głównie zawartością ferrytu AF i faz MAC. Najkorzystniejszą strukturę o najwyższej zawartości ferrytu AF i równocześnie najniższej zawartości faz MAC posiadało stopiwo zawierające nikiel, pokazano ją na rysunku 11.

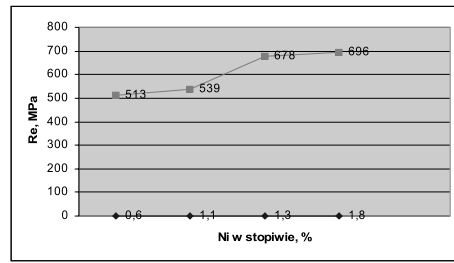
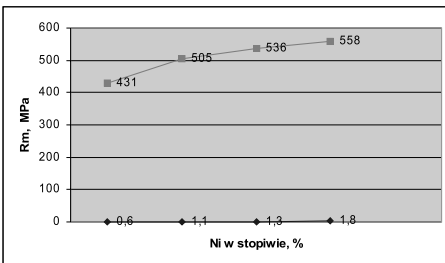


Rys. 11. Struktura stopiwa zasadowych elektrod o zawartości 2% Ni, ponad 70% drobnoziarnistego ferrytu (AF), powiększenie $\times 200$, trawiono Nitalem.

Uznano, iż najlepsze własności plastyczne ma stopiwo zawierające nikiel i molibden. Dla pełniejszej oceny stopiwa przeprowadzono badania wytrzymałościowe. Wyniki przedstawiono na rysunkach 12–13.

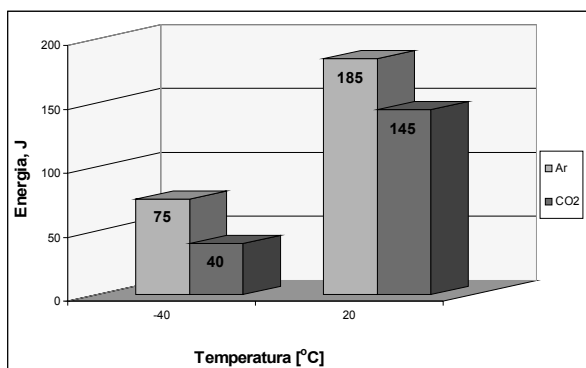


Rys. 12. Wpływ zawartości molibdenu na wytrzymałość stopiwa (R_m) oraz jego granicy plastyczności (R_e).



Rys. 13. Wpływ zawartości niklu na wytrzymałość stopiwa (R_m), oraz jego granicy plastyczności (R_e).

Właściwości mechaniczne stopiwa zawierającego nikiel i molibden są porównywalne. W obu przypadkach zaobserwowano dobre właściwości wytrzymałościowe stopiwa. Pomimo utwardzenia roztworowego stopiwa, wpływ niklu i molibdenu na zwiększenie odporności stopiwa na kruche pękanie (rozdzielcze) w ujemnych temperaturach jest bardzo duży. Korzystna struktura metalograficzna sprawia, że stopiwa z niklem i molibdenem posiadają dobrą udarność nawet w temperaturze -40°C . Dla pełniejszej informacji dotyczącej wpływu czynnika chemicznego na właściwości plastyczne stopiwa postanowiono przeanalizować dobór różnych gazów osłaniających (argon i dwutlenek węgla). Wykonano w tym celu stopiwo spawalniczymi metodami MIG/MAG. Udarność stopiwa wykonanego w czystym argonie oraz w osłonie CO_2 przedstawiono na rysunku 14.



Rys. 14. Energia łamania stopiwa nisko-stopowego wykonanego w różnych osłonach gazowych.

Badania potwierdziły, że na bezpieczeństwo konstrukcji mają wpływ właściwości mechaniczne stopiwa, które silnie zależą od jego składu chemicznego. Na właściwości stopiwa zwłaszcza duży wpływ ma zawartość pierwiastków stopowych takich jak C, Mn, Mo, Ni, Cr, V. Ważne mogą być też inne czynniki, do których można zaliczyć dobór mieszanek gazowych mających niewątpliwie wpływ na stężenie tlenu w stopiwie, który jest ważnym pierwiastkiem oddziałującym na właściwości plastyczne stopiwa. W przypadku spawania w osłonie argonu poziom tlenu jest niższy i przekłada się to na lepsze właściwości plastyczne.

3. Wnioski

1. Analizowane pierwiastki stopowe (Ni, Mo, Cr, Mn, V) stalowego stopiwa mają duży wpływ na właściwości mechaniczne i eksploatacyjne spawanego złącza.
2. Nikiel i molibden mogą być uważane za pierwiastki znacznie poprawiające właściwości plastyczne stopiwa. Stopiwa te posiadają dobrą udarność w niskich temperaturach.

3. Chrom i wanad pogarszają własności plastyczne stopiwa i nie powinny być do niego dodawane wobec niskiej udużności stopiwa w ujemnych temperaturach. Pierwiastki te sprzyjają tworzeniu się i wydzieleniu kruchych i niepożądanych faz MAC. Stopiwa posiadają dobrą wytrzymałość oraz wysoką granicę plastyczności.
4. Dobór mieszanki osłaniającej podczas spawania metodami MIG/MAG ma istotny wpływ na własności plastyczne stopiwa.

LITERATURA

- [1] E. Hadasik: *Przetwórstwo metali. Plastyczność a struktura*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
- [2] P. Judson, D. Mc Keown: *Advances in the control of weld metal toughness*, Offshore welded structures proceedings, London, V2., 1982.
- [3] J.F. Lancaster: *Physics of Welding*, Pergamon Press 1986.
- [4] T. Węgrzyn: *Oxygen and nitrogen in low carbon basic electrode weld metal deposits*, IIW Doc.II-A-1181-92, 1992.
- [5] C.J. Allum: *Nitrogen absorption from welding arc*, IIW.Doc.II-1115-88, 1988.
- [6] T. Węgrzyn: *A relation between the impact strength and the content of manganese, nickel, molybdenum and nitrogen in the deposited metal of low-alloy low-hydrogen electrodes*, „Przegląd Spawalnictwa”, Poland, N° 11/12: 1-6, 1996.
- [7] B.E. Paton, V.I. Lakomsky: *Interaction of molten metal with nitrogen from arc plasma*, IIW.Doc.II-A-871-92, 1992.
- [8] T. Węgrzyn: *The influence of the main factors on the impact toughness properties of low carbon steel welds*, Proceedings of ISOPE'97, Honolulu, USA, 1997.
- [9] T. Węgrzyn: *The classification of metal weld deposits in terms of the amount of nitrogen*, The Proceedings of ISOPE'2000, Seattle, USA, V4: 130-134, 2000.