Dorota KAPCIŃSKA-POPOWSKA
Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych
ul. Starołęcka 31, 60-963 Poznań
e-mail: office@pimr.poznan.pl

COMPARATIVE RESEARCH OF QUALITY AND DURABILITY OF WELDED JOINTS OF THE HARDOX 500 AND S355 STEELS

Summary

The paper presents changes of mechanical properties of welded joints of the HARDOX 500 and S355 steels made through different technological methods. Also the linear decomposition of the elements responsible for tribological properties of these steels is determined.

PORÓWNAWCZE BADANIA JAKOŚCIOWE I TRWAŁOŚCIOWE POŁĄCZEŃ SPAWANYCH STALI HARDOX 500 I STALI S355

Streszczenie

Artykuł przedstawia zmiany właściwości mechanicznych złącz spawanych ze stali HARDOX 500 i S355, wykonanych różnymi metodami technologicznymi. Określono również rozkład liniowy pierwiastków odpowiedzialnych za właściwości tribologiczne tych stali.

1. Wprowadzenie

Złącze spawane ma często niejednorodną strukturę, co wpływa negatywnie na jego właściwości mechaniczne. Właściwości złącza spawanego nie są takie same jak materiału rodzimego. W strefie wpływu ciepła występuje znaczne obniżenie właściwości plastycznych, czego konsekwencją są mikropęknięcia, pory, zażużlenia i inne wady. Zmiany strukturalne występujące w czasie nagrzewania i chłodzenia metalu wywołują wokół złącza spawanego silne pole naprężeń wewnętrznych.

Na poszczególne strefy złącza spawanego wpływ ma rodzaj zastosowanego materiału i przebieg procesów metalurgicznych spawania. Procesy te można podzielić na trzy grupy:

– Zjawiska fizyczne i reakcje chemiczne, które występują w łuku elektrycznym, między kroplą roztopionego metalu a atmosferą łuku. W łuku elektrycznym zachodzi dysocjacja cząstek oraz związków chemicznych, parowanie metalu, utlenianie metali i zawartych w nich składników, przechodzenie składników z atmosfery łuku do kropli, wzajemne oddziaływanie metalu i gazu oraz metalu i żużla.

– Reakcje chemiczne zachodzące w jeziorku ciekłego metalu oraz między jeziorkiem a warstwą żużla lub atmosferą ochronną. W jeziorku spawalniczym mogą występować: pochłanianie gazu oraz jego wydzielenia, odtlenianie i odazotowanie kąpieli, przechodzenie różnych pierwiastków i ich związków w kierunku jeziorka lub odwrotnie w kierunku żużla.

– Zjawiska zachodzące w strefie wpływu ciepła. W wyniku nagrzania materiału rodzimego do odpowiednio wysokiej temperatury, w zależności od rodzaju materiału i jego stanu, następują przemiany fazowe, związane z zahartowaniem, odpuszczeniem, dyfuzją i rekrystalizacją oraz zjawiska starzeniowe.

W praktyce istnieje wiele metod łączenia metali, jak również tworzyw sztucznych np.: spajanie na zimno, lutowanie, zgrzewanie itp. Wszystkie te metody odgrywają znaczną rolę w procesach produkcyjnych, jednak szczególne znaczenie ma spawanie [1, 2, 3, 4].

2. Przedmiot badań

Przedmiotem badań były próbki wykonane z następujących materiałów:

– stali HARDOX 500 w stanie dostawy,
– stali S355 (18G2) w stanie dostawy.

Skład chemiczny stali HARDOX 500 i S355 zbadano przy użyciu spektrometru SOLARIS-CCD i zestawiono w tab. 1.

3. Cel pracy

Celem pracy było:

– porównanie właściwości mechanicznych złącz spawanych ze stali HARDOX 500 i S355, wykonanych różnymi metodami technologicznymi,
– określenie rozkładu liniowego pierwiastków odpowiedzialnych za właściwości tribologiczne stali HARDOX 500 i S355. W celu określenia tych właściwości przeprowadzono następujące badania:
– wytrzymałościowe,
– technologiczną próbę zginania,
– twardości (w skali HRC),
– strukturalne złącz spawanych,
– rozkładu pierwiastków.

Tab. 1. Skład chemiczny stali HARDOX 500 i S355 [5, 6]
Table 1. Chemical composition of the HARDOX 500 and S355 steels [5, 6]

Materiał	C %max	Si %max	Mn %max	P %max	S %max	Cr %max	Ni %max	Mn %max	Al %max	Cu %max
HARDOX 500	0,18	0,45	1,5	0,025	0,01	1,0	0,30	-	-	-
S355	0,20	0,25	1,20	0,04	0,04	0,30	0,30	1,50	0,02	0,30

4. Przygotowanie próbek do badań

Przygotowanie próbek do spawania

Z uwagi na znaczną twardość i właściwości wytrzymałościowe stali HARDOX 500 próbki wycięto strumieniem wody 3D w firmie Quatro na maszynie Water Jet. Obróbka strumieniem wody pozwala na cięcie materiałów o dużo większej grubości, nie powodując żadnych zmian strukturalnych wywołanych wysoką temperaturą, w porównaniu do tradycyjnego cięcia laserem i plazmą.

Próbki ze stali S355 wykonano klasyczną metodą obróbki skrawaniem.

Techniki spawania próbek

Próbki przed spawaniem metodą A i B ze stali HARDOX 500 i S355 zostały sfazowane pod kątem 45º.

Metoda A:

- spawarka H150-1 firmy Lorch,
- spawanie migomatem,
- drut: Ø 1,2mm,
- osłona: korgon =CO_2 + argon,
- prąd spawania: 170A.

Metoda B:

- spawanie tradycyjne (elektrodą),
- elektroda: Ø 2,5mm, Elga AB,
- prąd spawania: 95A.

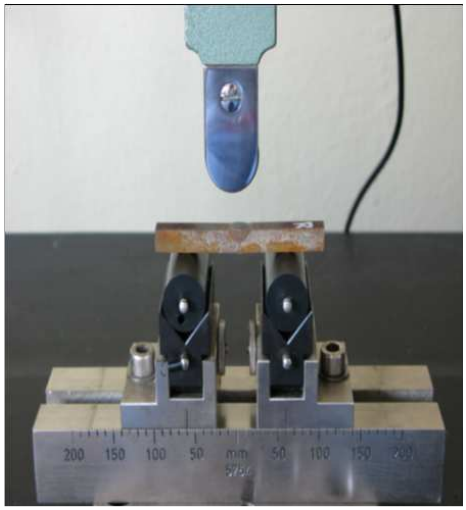
Cięcie spawanych próbek

Po spawaniu próbki były ponownie wycięte strumieniem wody w firmie Quatro na maszynie Water Jet. Zastosowanie cięcia tą metodą było istotne ze względu na konieczność zachowania (bez zmian) struktury i właściwości mechanicznych stali i złącza spawanego.

5. Badania wytrzymałościowe i technologiczna próba zginania

Badania wytrzymałościowe i technologiczną próbę zginania złącz spawanych ze stali HARDOX 500 i S355 przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej typu HT-2402 (rys. 1). Badania te przeprowadzono zgodnie z normami: PN-EN ISO 7438 (technologiczna próba zginania) i PN-EN 10002-1 (badania wytrzymałości na rozciąganie).

Rys. 1. Maszyna wytrzymałościowa HT-2402
Fig. 1. Endurance machine HT-2402



Rys. 2. Technologiczna próba zginania
Fig. 2. Technological bending test HT-2402

Rys. 3. Widok próbek przeznaczonych do badań technologicznej próby zginania
Fig. 3. View of the samples purposed for technological bending test research

Rys. 4. Widok przykładowej próbki przeznaczonej do badań wytrzymałościowych
Fig. 4. View of the sample purposed for strength tests

Zadane parametry podczas przeprowadzanych badań:

– głowica: 50kN,
– posuw: 50mm/min.

Wyniki badań wytrzymałościowych stali HARDOX 500 i S355 przedstawiono w tab. 2 i 3.

Wyniki badań technologicznej próby zginania stali HARDOX 500 i S355 przedstawiono w tabelach 4–7.

Badania właściwości mechanicznych stali HARDOX 500 i S355 wykazały, że najwyższą wytrzymałością na rozciąganie charakteryzuje się stal HARDOX 500 i wynosi 1282MPa.

Tab. 2. Wyniki badań wytrzymałościowych stali HARDOX 500
Table 2. Tests results of mechanical properties of the HARDOX 500 steel

Lp.	Materiał	Siła max [N]	Granica plastyczności Re [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie Rm [MPa]	Wydłużenie względne A [%]
1.	HARDOX 500	36100	1179	1276	12
2.		36400	1229	1287	10
∑		**36250**	**1204**	**1282**	**11**

Tab. 3. Wyniki badań wytrzymałościowych stali S355
Table 3. Tests results of mechanical properties of the S355 steel

Lp.	Materiał	Siła max [N]	Granica plastyczności Re [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie Rm [MPa]	Wydłużenie względne A [%]
1.	S355	17837	605	630	14
2.		17600	362	622	17
3.		17087	378	604	16
∑		**17508**	**449**	**619**	**15**

Tab. 4. Wyniki badań technologicznej próby zginania stali HARDOX 500 spawanej metodą A
Table 4. Results of technological bending tests of the HARDOX 500 steel, welded according to A method

Lp.	Materiał	Siła max [N]	Naprężenia zginające R_{zg} [MPa]	Wydłużenie względne A [%]
1.	HARDOX 500	8715	87	23
2.		9285	93	33
3.		7350	74	12
∑		**8450**	**85**	**22**

Tab. 5. Wyniki badań technologicznej próby zginania stali HARDOX 500 spawanej metodą B
Table 5. Results of technological bending tests of the HARDOX 500 steel, welded according to B method

Lp.	Materiał	Siła max [N]	Naprężenia zginające R_{zg} [MPa]	Wydłużenie względne A [%]
1.	HARDOX 500	6960	70	11
2.		3557	36	10
3.		10490	105	20
∑		**7002**	**70**	**14**

Tab. 6. Wyniki badań technologicznej próby zginania stali S355 spawanej metodą A
Table 6. Results of technological bending tests of the S355 steel, welded according to A method

Lp.	Materiał	Siła max [N]	Naprężenia zginające R_{zg} [MPa]	Wydłużenie względne A [%]
1.	S355	7835	78	2
2.		7404	74	30
3.		6270	63	34
∑		**7169**	**72**	**22**

Tab. 7. Wyniki badań technologicznej próby zginania stali S355 spawanej metodą B
Table 7. Results of technological bending tests of the S355 steel, welded according to B method

Lp.	Materiał	Siła max [N]	Naprężenia zginające R_{zg} [MPa]	Wydłużenie względne A [%]
1.	S355	9815	98	31
2.		7795	78	39
3.		6945	69	36
∑		**8185**	**82**	**35**

Badania parametrów zginania (technologiczna próba zginania) stali HARDOX 500 i S355 wykazały, że:

– dla połączenia spawanego ze stali HARDOX 500 metodą A naprężenie zginające wyniosło 85MPa. Wartość naprężenia zginającego jest większa o około 18% niż w przypadku tej samej stali, jednak spawanej metodą B,

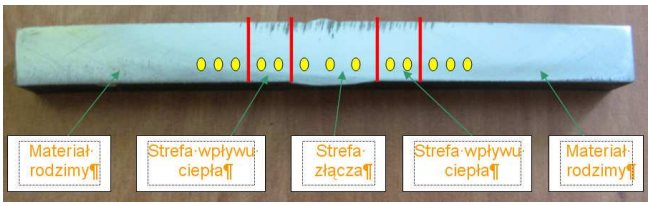
– dla połączenia spawanego ze stali S355 metodą B naprężenie zginające wyniosło 82MPa. Wartość naprężenia zginającego jest większa o około 12% niż w przypadku tej samej stali, jednak spawanej metodą A.

6. Porównawcze badania twardości

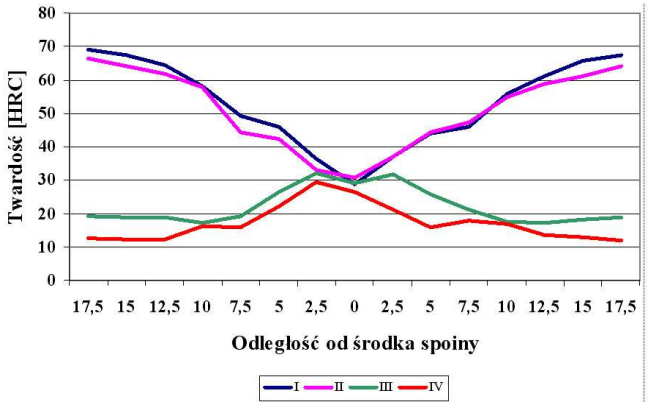
Twardość złącz spawanych próbek ze stali HARDOX 500 i S355 zbadano przy użyciu twardościomierza marki „Zwick", typ ZHR4150AK (rys. 5), stosując pomiar metodą Rockwella, w skali „C". Pomiary wykonano w trzech strefach próbki (rys. 6) z dokładnością ± 2 HRC, zgodnie z PN-EN ISO-6508.

Wyniki badań twardości stali HARDOX 500 i S355 przedstawiono na rys. 7.

Rys. 5. Twardościomierz „Zwick" Rockwell'a ZHR.4150 AK
Fig. 5. Hardness tester "Zwick" Rockwell'a ZHR.4150 AK



Rys. 6. Próbka do badań twardości
Fig. 6. Sample for hardness tests



Rys. 7. Wykres obrazujący rozkład twardości w próbkach
Fig. 7.Graph of the hardness distribution in the samples

7. Badania strukturalne złącz spawanych

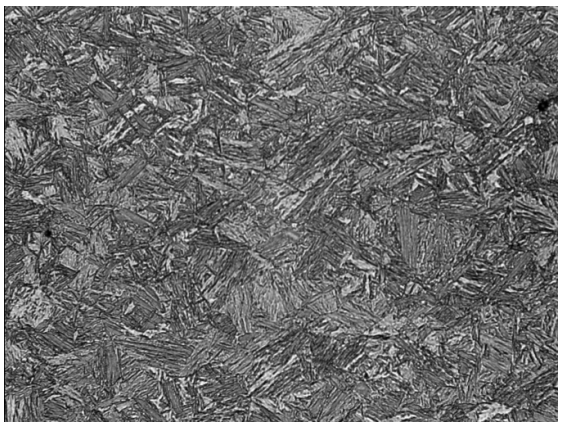
Zgłady metalograficzne przygotowano na szlifierko-polerce Firmy Forcipol (rys. 8). Następnie, próbki złącz spawanych odpowiednio wypolerowanych i wytrawionych odczynnikiem Ni1Fe (nital 2%) poddano obserwacji w różnych strefach złącz (przy powiększeniu 250 x). Celem tego było zaobserwowanie różnic strukturalnych występujących w złączu spawanym.

Podłączony aparat Canon G9 do mikroskopu metalograficznego typu MET3 – XJP– 6 (rys. 9) umożliwił zapis cyfrowy struktur oraz przesłanie i obróbkę zdjęć w specjalistycznym programie Zoom Browser.

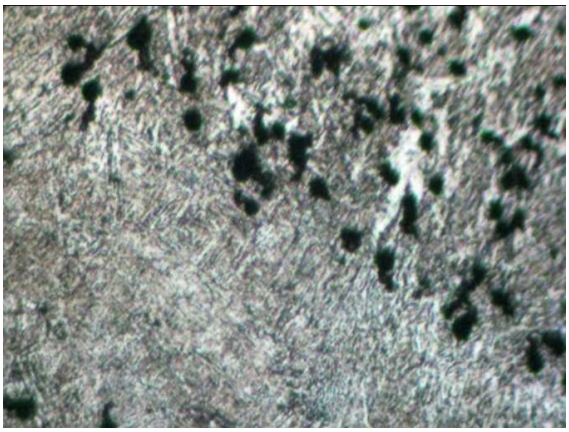
Rys. 8. Szlifierko-polerka Firmy Forcipol
Fig. 8. Forcipol' s polishing machine

Rys. 9. Mikroskop metalograficzny typu MET3-XJP-6
Fig. 9. Metallographic microscope, type: MET3-XJP-6

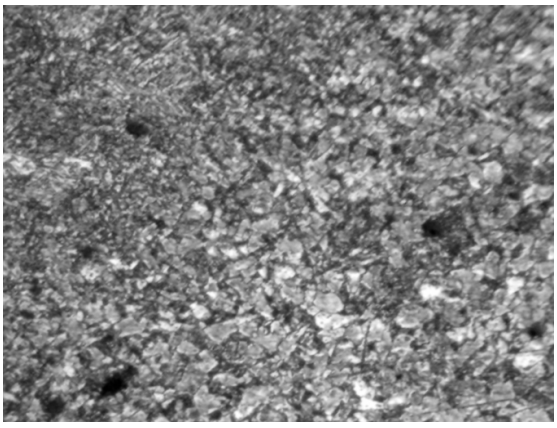
Wyniki badań strukturalnych przedstawiono na rysunkach 10–15.



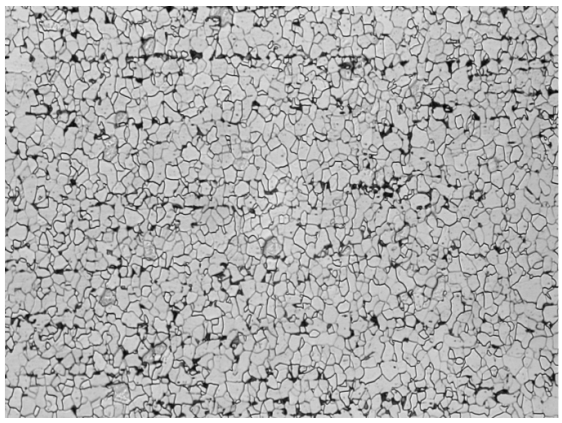
Rys. 10. Próbka ze stali Hardox 500 – przed spawaniem. Struktura bainityczna. Powiększenie 250 x
Fig. 10. Sample of the Hardox 500 steel – before welding. Bainit structure. Magnification 250 x



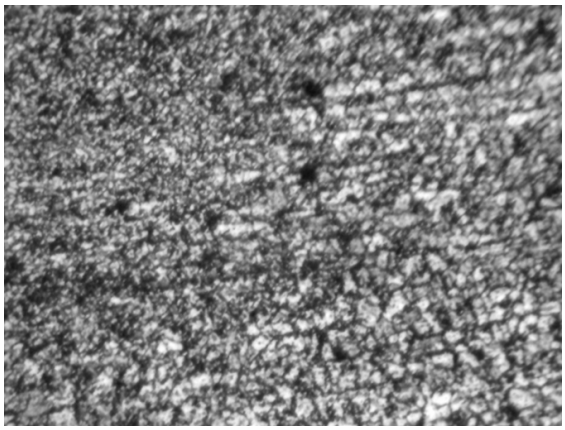
Rys. 11. Próbka ze stali Hardox 500 – po spawaniu metodą A. Widoczne „gwałtowne" przejście i liczne zanieczyszczenia w strefie spawu. Bainit, ferryt i austenit szczątkowy. Powiększenie 250x
Fig. 11. Sample of the Hardox 500 steel – after welding through A method. Visible violent phase transition and numerous impurities in the weld melt. Bainit, ferrite and retained austenite. Magnification 250x.



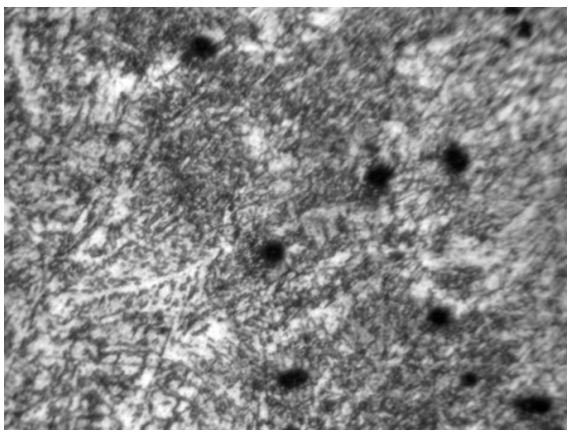
Rys. 12. Próbka ze stali Hardox 500 – po spawaniu metodą B. Widoczne przejście i niewielkie zanieczyszczenia w strefie spawu. Struktura gruboziarnista, obecność bainitu, ferrytu i austenitu szczątkowego. Powiększenie 250x
Fig. 12. Sample of the Hardox 500 steel – after welding through B method. Visible transition and impurities in the weld melt. Coarse – grained structure, bainit, ferrite and retained austenite. Magnification 250x.



Rys. 13. Próbka ze stali S355 – przed spawaniem. Struktura ferrytyczno-perlityczna, widoczna pasmowość. Powiększenie 250x
Fig. 13. Sample of the S355 steel – before welding. Pearlitic and ferritict structure, banded - structure. Magnification 250x.



Rys. 14. Próbka ze stali S355 – po spawaniu metodą A. Struktura ferrytyczno-perlityczna z dużą ilością ferrytu, widoczna pasmowość ferrytu. Niewielka ilość zanieczyszczeń w strefie spawu. Powiększenie 250x
Fig. 14. Sample of the S355 steel – after welding through A method. Pearlitic and ferritict structure with lots of ferrite, ferrite banded - structure. Visible impurities in the weld melt. Magnification 250x



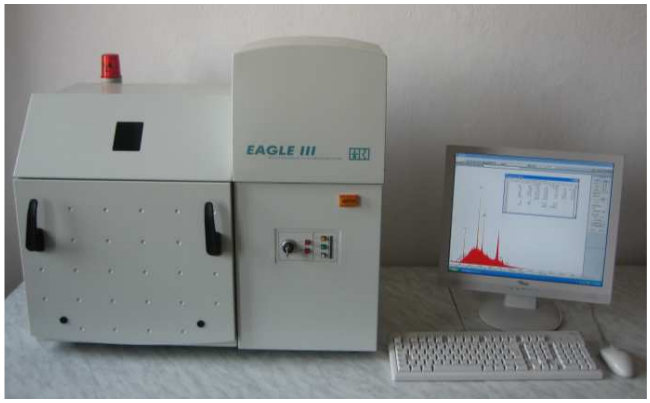
Rys. 15. Próbka ze stali 18G2 – po spawaniu metodą B. Ferryt, perlit i austenit szczątkowy, widoczna pasmowość ferrytu. Duża ilość zanieczyszczeń w strefie spawu. Powiększenie 250x
Fig. 15. Sample of the S355 steel – after welding through B method. Bainit, ferrite and retained austenite, ferrite banded – structure. Visible impurities in the weld melt. Magnification 250x.

Analiza struktur złącz spawanych ze stali HARDOX 500 i S355 wykazała, że najwięcej zanieczyszczeń w spoinie i strefie wpływu ciepła (SWC) pojawiły się w stali:
– HARDOX 500 spawanej metodą A,
– S355 spawanej metodą B.
Gwałtowne przejścia w strukturze, które wystąpiły w próbkach ze stali HARDOX 500, znacznie obniżyły właściwości mechaniczne spoiny.

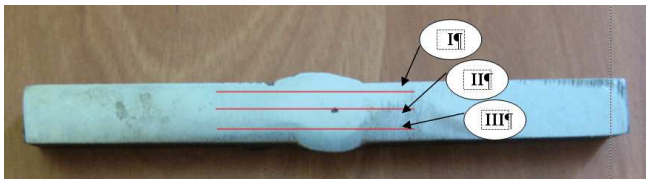
8. Badania rozkładu pierwiastków odpowiedzialnych za właściwości tribologiczne stali

Badania segregacji pierwiastków (Cr, Mn) odpowiedzialnych za właściwości tribologiczne badanych stali przeprowadzono na spektrometrze fluorescencji rentgenowskiej EAGLE III firmy Röntgenanalitik Messtechnik GmbH prod. niemieckiej (rys. 16) stosując metodę Line Scan, rys. 17.

Spektrometr EAGLE III umożliwia precyzyjną i nieniszczącą analizę składu chemicznego w ciałach stałych i w cieczach, w zakresie pierwiastków od Na do U na poziomie ich wykrywalności poprzez zastosowanie wzbudzenia przy użyciu fluorescencyjnego promieniowania rentgenowskiego.
Ustalone parametry do badań składu chemicznego:
– 20kV,
– 100µA,
– czas pomiaru jednego punktu 500ms,
– liczba badanych punktów w linii: 256,
– atmosfera badań: powietrze.
Badanie przeprowadzono w trzech miejscach (rys. 16):
– górna część próbki – I,
– środkowa część próbki – II,
– dolna część próbki – III.

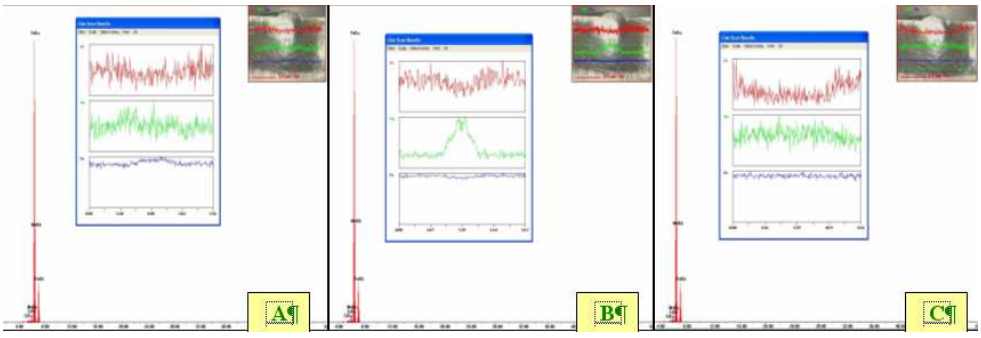


Rys. 16. Spektrometr fluorescencji rentgenowskiej Eagle III prod. niemieckiej
Fig. 16. Spectrometer Eagle III

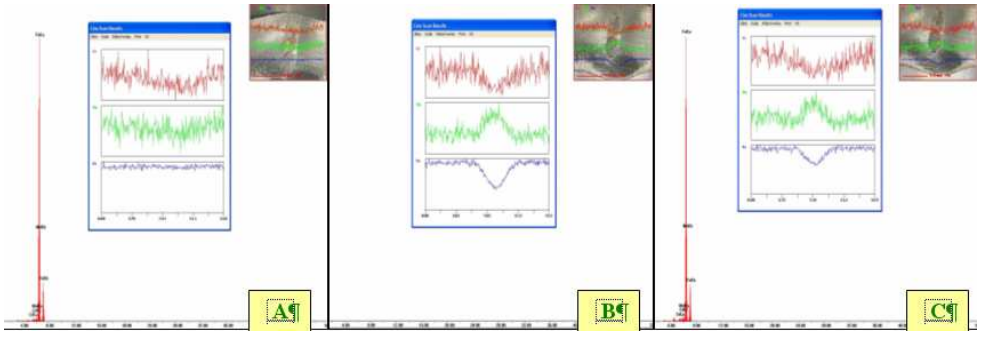


Rys. 17. Widok próbki
Fig. 16. View of the sample

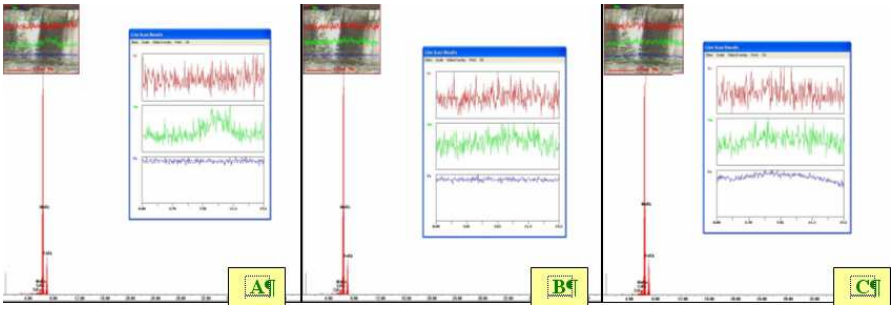
Na rysunkach 18–21 przedstawiono widma badanych złącz spawanych stali HARDOX 500 i S355, natomiast tabele 8–11 zawierają ilościową ocenę pierwiastków (Cr i Mn) wykrytych przez spektrometr fluorescencji rentgenowskiej Eagle III.



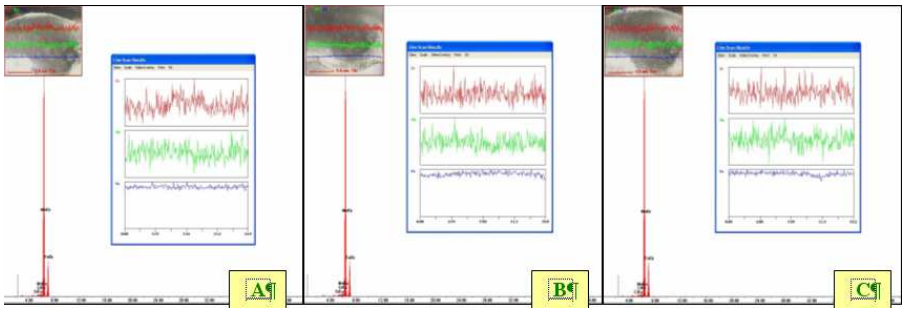
Rys. 18. Rozkład pierwiastków w próbce ze stali HARDOX 500 spawanej metodą A, w liniach: I–A, II-B, III- C
Fig. 18. Distribution of elements in the HARDOX 500 steel welding of A method in the lines: I-A, II-B, III - C



Rys. 19. Rozkład pierwiastków w próbce ze stali HARDOX 500 spawanej metodą B w liniach: I–A, II-B, III- C
Fig. 19. Distribution of elements in the HARDOX 500 steel welding of B method in the lines: I-A, II-B, III - C



Rys. 20. Rozkład pierwiastków w próbce ze stali S355 spawanej metodą A w liniach: I–A, II-B, III- C
Fig. 20. Distribution of elements in the S355 steel welding of A method in the lines: I-A, II-B, III - C



Rys. 21. Rozkład pierwiastków w próbce ze stali S355 spawanej metodą B w liniach: I–A, II-B, III- C
Fig. 21. Distribution of elements in the S355 steel welding of B method in the lines: I-A, II-B, III - C

Tab. 8. Ilościowa ocena spektrometryczna pierwiastków Cr i Mn w złączu spawanym metodą A stali HARDOX 500
Table 8. Quantitative evaluation of Cr and Mn elements in the joint welded through A method of the HARDOX 500 steel

HARDOX 500	%Cr	%Mn
I	0,247	0,636
II	0,249	0,839
III	0,173	0,663

Tab. 9. Ilościowa ocena spektrometryczna pierwiastków Cr i Mn w złączu spawanym metodą B stali HARDOX 500
Table 9. Quantitative evaluation of Cr and Mn elements in the joint welded through B method of the HARDOX 500 steel

HARDOX 500	% Cr	%Mn
I	0,180	0,394
II	0,369	0,902
III	0,310	0,706

Tab. 10. Ilościowa ocena spektrometryczna pierwiastków Cr i Mn w złączu spawanym metodą A stali S355
Table 10. Quantitative evaluation of Cr and Mn elements in the welded joint of A method of the S355 steel

S355	% Cr	%Mn
I	0,104	0,652
II	0,126	0,620
III	0,117	0,701

Tab. 11. Ilościowa ocena spektrometryczna pierwiastków Cr i Mn w złączu spawanym metodą B stali S355
Table 11. Quantitative evaluation of Cr and Mn elements in the welded joint of B method of the S355 steel

S355	% Cr	%Mn
I	0,151	0,488
II	0,154	0,547
III	0,158	0,507

W stali HARDOX 500 w złączu spawanym metodą A znaczące zmiany segregacji manganu zauważono w linii II (największa migracja) – zawartość ilościowa Mn 0,636%. W złączu spawanym metodą B zmiany te widoczne były w II i III linii – zawartość ilościowa Mn 0,636%.

W złączach spawanych stali S355 znaczące zmiany segregacji manganu zauważono w próbce spawanej metodą A w I linii.

Należy przy tym podkreślić, że segregacja chromu w próbkach typu HARDOX 500 i S355 utrzymywała się na podobnym poziomie, w zależności od metody spawania (A lub B).

9. Wnioski

Na podstawie wykonanych porównawczych badań fizykomechanicznych, metalograficznych i spektrometrycznych połączeń spawanych stali HARDOX 500 i S355 stwierdzono, że:

1. Metoda spawania typu A (spawanie migomatem) jest najlepsza dla stali HARDOX 500, natomiast dla stali S355 metoda B (spawanie elektrodą).
2. Badania spektrometryczne posłużyły do zaobserwowania migracji pierwiastków odpowiedzialnych za właściwości tribologiczne stali HARDOX 500 (Cr, Mn) w złączach spawanych. Wyniki z przeprowadzonych badań wykazały duże ich zróżnicowanie, w zależności od metody spawania A i B, co potwierdziło konieczność racjonalnego wyboru technologii spawania dla tych stali.

10. Literatura

[1] Dobrzański L.: Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Wydanie drugie zmienione i uzupełnione, Gliwice – Warszawa, 2006.
[2] Lisowski Z. Rudowski S.: Spawalnictwo. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Szkolnictwa Zawodowego, 1961.
[3] Zatyka H.: Spawanie i nitowanie. Warszawa: Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, 1975.
[4] Poradnik spawalniczy. Warszawa, 1966.
[5] Internet.
[6] Karta katalogowa stali HARDOX 500.