

Własności mechaniczne stali 13CrMo4-5

Krzysztof Rokosz, Sławomir Rzadkiewicz, Tadeusz Hryniewicz

Streszczenie

W pracy zaprezentowano wyniki badań stali 13CrMo4-5 ze względu na własności mechaniczne. Badany materiał jest najczęściej używany do produkcji wysokociśnieniowych rurociągów parowych w elektrociepłowniach. Do badań użyto rury ze stali 13CrMo4-5 o średnicy $\phi 159$ mm i grubości 14,2 mm. Wykonano próby rozciągania, zginania, badania twardości, mikrostruktury oraz składu chemicznego. Naprężenie graniczne w próbie rozciągania wyniosło średnio 452 MPa. Próbkę została poddana zginaniu o kącie gięcia 180° . Zmierzona twardość dla wyżej wymienionej stali wyniosła $147 \pm 7,67$ HV10. Badania mikrostruktury wykazały ferrytyczno-bainityczną strukturę materiału. Artykuł obrazuje badania, które można wykorzystać do kontroli jakości nowo wykonanych wyrobów, celem eliminacji produktów niespełniających wymagań określonych normą przedmiotową lub wymagań wykonania odbioru WUDT.

Słowa kluczowe: stal 13CrMo4-5, badania wytrzymałościowe, próba rozciągania, próba zginania, metalografia, odporność korozyjna, radiografia.

Wstęp

Współczesny rozwój przemysłu wpłynął znacząco na zwiększenie parametrów pracy i mocy urządzeń energetycznych, a to z kolei spowodowało wzrost wymagań w stosunku do nowych gatunków materiałów, z których są wykonane maszyny energetyczne [1, 2]. Jednym z takich materiałów wykorzystywanych do wytwarzania elementów narażonych na wysokie temperatury jest stal 13CrMo4-5 [3] charakteryzująca się podwyższoną odpornością na wysokie temperatury oraz korozję. Materiał ten doskonale sprawdza się w środowisku o odczynie kwasowym, często spotykanym w urządzeniach i instalacjach budowlanych dla przemysłu rafineryjnego, petrochemicznego oraz gazownictwa [4]. Materiały stosowane w tak szczególnych warunkach muszą spełniać określone w atestach i normach wymagania zarówno pod względem mechanicznym: wytrzymałość na rozciąganie [6], zginanie [7], twardość [8, 9, 10] ale również mieć odpowiednie właściwości metalograficzne [10, 11], radiograficzne [12, 13] i chemiczne [14].

1. Metodyka

1.1. Stal użyta do badań

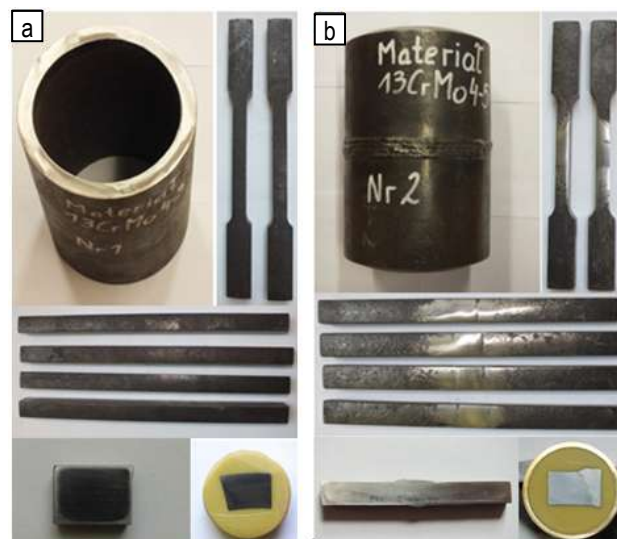
Do badań użyto stali 13CrMo4-5 o składzie pokazanym w Tablicy 1. Próbkę przygotowano z materiału pobranego z: rury $\phi 159 \times 14,2$ mm wykonanej z materiału 13CrMo4-5 (rys. 1a) oraz króćca $\phi 159 \times 14,2$ mm, 13CrMo4-5 (rys. 1b). Próbę rozciągania wykonano na próbkach przygotowanych dla rury zgodnie z normą PN-EN ISO 6892-1, dla króćca zgodnie z normą PN-EN ISO 4136. Pomiary twardości przeprowadzono na próbkach przygotowanych według normy PN-EN ISO 15614-1:2008. Próbkę do badań mikrostruktury oszlifowano za pomocą tlenku glinu oraz wytrawiono nitaliem (Mi1Fe według normy PN61/H-04503).

1.2. Stanowiska pomiarowe

Badania wytrzymałościowe wykonano przy użyciu maszyny ZD40 o napędzie hydraulicznym oraz sterowaniu elektrycznym. Zakres pomiarowy maszyny wynosi od 0 do 400 kN. Dokładność pomiarowa wynosi $\pm 1\%$. Stanowisko to wykorzystano zarówno do próby rozciągania jak i zginania (rys. 2a). Pomiar twardości przeprowadzono metodą Vickersa przy użyciu twardościomierza HPO-250 (rys. 2b).

Tablica 1. Skład chemiczny stali 13CrMo4-5
Table 1. The composition of steel 13CrMo4-5

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0,16	0,213	0,475	0,0082	0,0025	0,8	0,03	0,471
Cu	Co	Ti	Nb	V	W	Pb	Mg
0,019	0,0057	0,0005	0,004	0,001	0,007	0,002	0,0012
Sb	Sn	Zn	As	Bi	Ta	Ca	Ce
0,0026	0,0046	0,0031	0,01	0,0015	0,01	0,0017	0,0021
La	Se	N	Al	B	Zr	Fe	
0,0005	0,002	0,006	0,012	0,0008	0,00015	97,8	

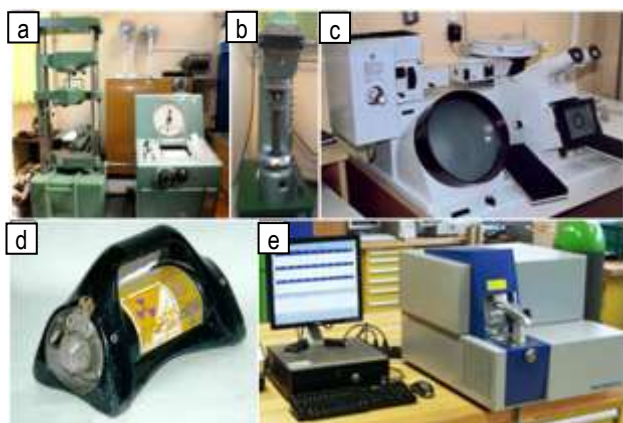


Rys. 1 Próbkę pobrane z: rury $\phi 159 \times 14,2$ mm wykonanej z materiału 13CrMo4-5 (a), króćca $\phi 159 \times 14,2$ mm 13CrMo4-5 (b) [5]

Fig. 1. Samples acquired from: pipe $\phi 159 \times 14.2$ mm made of 13CrMo4-5 steel (a), the connector $\phi 159 \times 14.2$ mm 13CrMo4-5 steel (b) [5]

Urządzenie wykonuje pomiary twardości wyżej wymienioną metodą dla: dziesięciu stopni obciążenia (49,03 N; 98,07 N; 147,1 N; 196,1 N; 294,2 N; 392,3 N; 490,3 N; 588,4 N; 980,7 N; 1176,8 N), trzech powiększeń obiektywów urządzenia projekcyjnego (35×, 70×, 140×), zakresu pomiaru odcisku od 0 do 1,6 mm oraz dokładności pomiaru: $\pm 1 \mu\text{m}$ (śruba mikrometryczna).

W przypadku badań metalograficznych złączy użyto odwróconego mikroskopu metalograficznego na światło odbite NEOPHOT 32 (rys. 1c). Zakres powiększeń urządzenia wynosi od 10 do 2000 razy, co w połączeniu z metodami obserwacji w świetle jasnym, ciemnym oraz spolaryzowanym daje możliwości określenia wyglądu oraz stanu ziarna, stwierdzenia zanieczyszczeń oraz określenia prawidłowości wiązań między ziarnami. Do badań radiograficznych użyto urządzenia izotopowego SENTINEL 880 Élite (rys. 2d), wykorzystującym jako źródło promieniowania selen 75 (Se75). Urządzenie służy do przemysłowej radiografii gamma materiałów i struktur o zakresie gęstości od $2,71 \text{ g/cm}^3$ do $8,53 \text{ g/cm}^3$. Skład chemiczny stali zbadano spektrometrem CDS CCD (rys. 2e) określającym automatycznie ilości pierwiastków w próbce przy wykorzystaniu widma masowego.



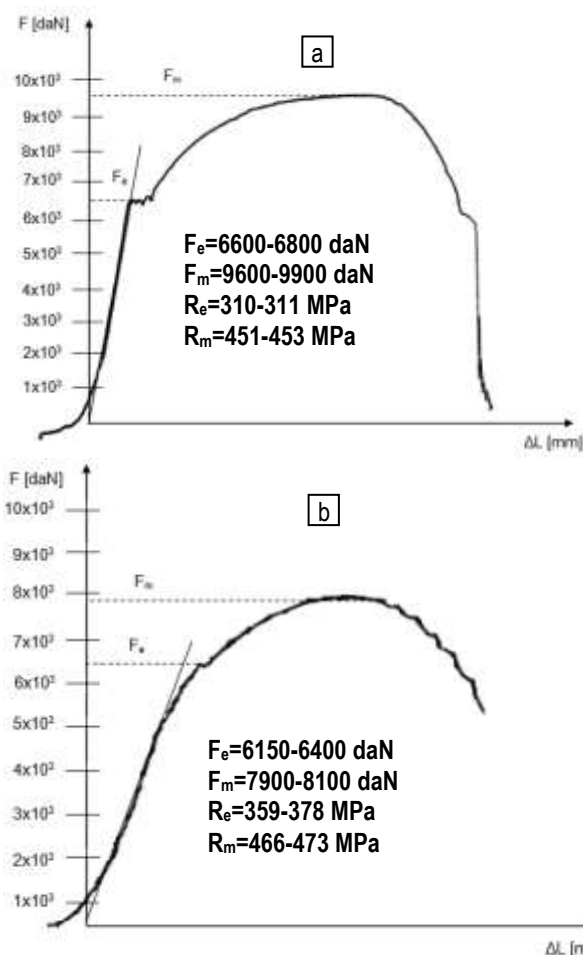
Rys. 2. Stanowiska badawcze: maszyna wytrzymałościowa ZD-40 (a), twardościomierz Vickersa (b), mikroskop metalograficzny Neophot 32 (c), przyrząd do badań radiograficznych Sentinel 880 Élite (d), Spektrometr CDS CCD do badania składu chemicznego stali (e) [5]

Fig. 2. Posts of research: testing machine ZD-40 (a), Vickers hardness tester (b) metallographic microscope Neophot 32 (c), a device for radiographic examination Sentinel Elite 880 (d), CDS CCD spectrometer to study the chemical composition of the steel (e) [5]

2. Wyniki

Podczas badań wytrzymałości na rozciąganie próbek stali 13CrMo4-5 pobranych z rury $\phi 159 \times 14,2 \text{ mm}$ (Rys. 3a) ustalono wartości graniczne sił rozciągających F_e dla granicy plastyczności na poziomie od 6600 daN do 6800 daN oraz naprężenie graniczne R_e odpowiednio od 310 MPa do 311 MPa. Największa siła rozciągająca wytrzymałości na rozciąganie F_m wynosiła odpowiednio od 9600 daN do 9900 daN i uzyskiwała wartości graniczne naprężenia R_m na poziomie 451 MPa do 453 MPa. Wytrzymałość na rozciąganie próbek pobranych z króćca $\phi 159 \times 14,2 \text{ mm}$ (Rys. 3b) dla wartości granicznej naprężenia R_m od 466 MPa oraz 473 MPa przy przyłożonej największej sile rozciągającej

F_m od 7900 daN do 8100 daN. Wartości graniczne sił rozciągających dla granicy plastyczności F_e materiału wyniosły odpowiednio od 6150 daN do 6400 daN przy wartościach granicznych naprężenia R_e od 359 MPa do 378 MPa.



Rys. 3. Wykresy i wyniki statycznego rozciągania próbek: pobranej z rury (a), pobranej z króćca (b) [5]

Fig. 3. Charts and results of the static tensile test: acquired from the pipe (a), acquired from the connector (b) [5]

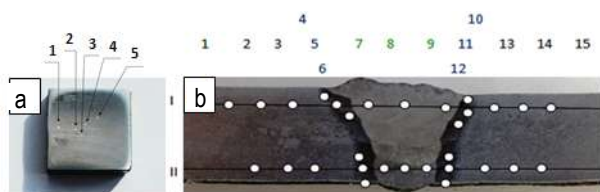
Badania wytrzymałości na zginanie, zarówno próbek wykonanych z rury jak i z króćca, nie ujawniły wad materiału jakim jest stal 13CrMo4-5 oraz połączenia spawalniczego wykonanego w tym materiale, a kąt gięcia wyniósł dla obydwu materiałów 180° (rys 4).

Wyniki pomiaru twardości metodą Vickersa w punktach pomiarowych zaznaczonych na rysunku 5a dla próbki stali pobranej z rury przedstawiono w tabelcy 2. Wartość średnia pomiaru twardości wyniosła 147 przy wariancji 58,8, odchyleniu standardowym 7,67 i rozstępie 23. Wyniki dla próbki stali z króćca w punktach pomiarowych pokazanych na rysunku 5b przedstawiono w Tabelcy 3. Wartość średnia arytmetyczna pomiaru wartości twardości wyniosła dla I linii pomiarowej 228,4, wariancja 4092,24, odchylenie standardowe 63,97 i rozstęp 214. Dla II linii pomiarowej średnia arytmetyczna pomiarów twardości wyniosła 198,4, wariancja 1183,44, odchylenie standardowe 34,4 oraz rozstęp 114.



Rys. 4. Próbkę stali po wykonaniu próby zginania: pobrane z rury (a), pobrane z króćca (b) [5]

Fig. 4 Steel specimen after the bending test: acquired from the pipe (s), acquired from the connector (b) [5]



Rys. 5. Próbkę wraz z punktami pomiarowymi pobrane: z rury (a), z króćca (b) [5]

Fig. 5. The samples, together with the measuring points, taken from: the pipe (a), the connector (b) [5]

Tablica 2. Wyniki pomiarów twardości z próbki pobranej z rury [15]

Table 2. The results of the hardness measurement of the sample acquired from a pipe [15]

Próbka stali 13CrMo4-5 pobrana z rury	Twardość HV [10]				
	Materiał podstawowy				
	1	2	3	4	5
Powierzchnia odcisku	0,341	0,358	0,351	0,369	0,359
Twardość Vickersa HV [10]	159	145	151	136	144

Na podstawie badań mikroskopowych fragmentu próbki pobranego z króćca określono strukturę materiału podstawowego jako ferrytyczno-bainityczną oraz spoiny jako bainityczno-perlityczną. Dla rury określono strukturę jako ferrytyczno-bainityczną w układzie pasmowym, stopień pasmowości, skala 2 – A, wzorzec 5 według normy PN-63 /H-04504. Wielkość ziarna przy powiększeniu 100× – G=9 według normy PN-84/H-04507/01.

Wyniki badania składu chemicznego stali 13CrMo4-5 z rury nr 1 $\phi 159 \times 14,2$ mm przedstawiono w tabelicy 4. Dla uwiarygodnienia wyników każdy z pomiarów powtórzono trzykrotnie dla uniknięcia błędów pomiarowych.

Tablica 3. Wyniki pomiarów twardości z próbki z króćca [5]

Table 3. The results of the hardness measurement of the sample from the connector [5]

Próbka stali 13CrMo4-5 pobrana z króćca		Powierzchnia odcisku	Twardość HV [10]				
			Powierzchnia odcisku	Twardość HV [10]			
Linia pomiarowa		I		II			
Twardość HV [10]	Materiał podstawowy	Nie poddany wpływowi ciepła	1	0,334	166	0,344	157
			2	0,330	170	0,343	158
			3	0,328	172	0,323	178
		SWC	4	0,259	276	0,300	206
			5	0,226	363	0,286	227
			6	0,246	306	0,276	243
	Materiał spoiny	7	0,256	283	0,283	232	
		8	0,280	287	0,300	206	
		9	0,303	202	0,296	212	
	Materiał podstawowy	SWC	10	0,259	276	0,283	232
			11	0,283	232	0,287	225
			12	0,291	219	0,284	230
		Nie poddany wpływowi ciepła	13	0,334	166	0,315	187
			14	0,342	159	0,379	129
			15	0,353	149	0,347	154

Podczas badania radiograficznego na całym odcinku spoiny nie wykryto wad spawalniczych (niezgodności spawalniczych). Badania radiograficzne jak i ocenę złącza spawanego wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 5817.

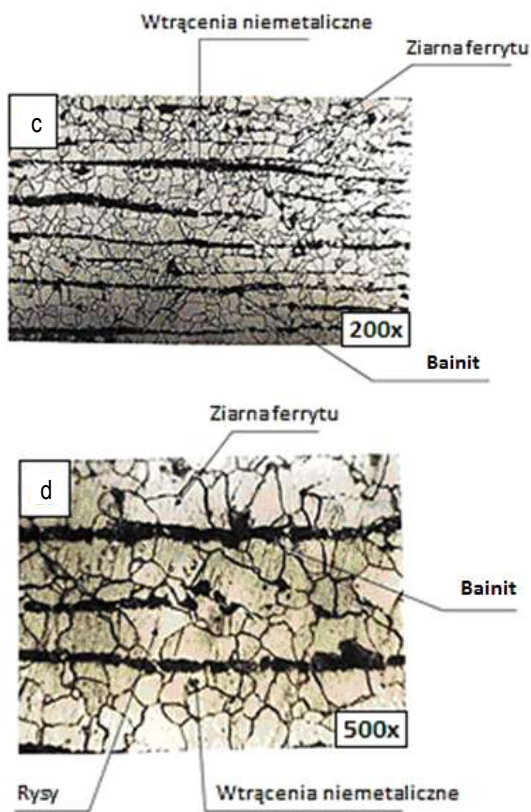
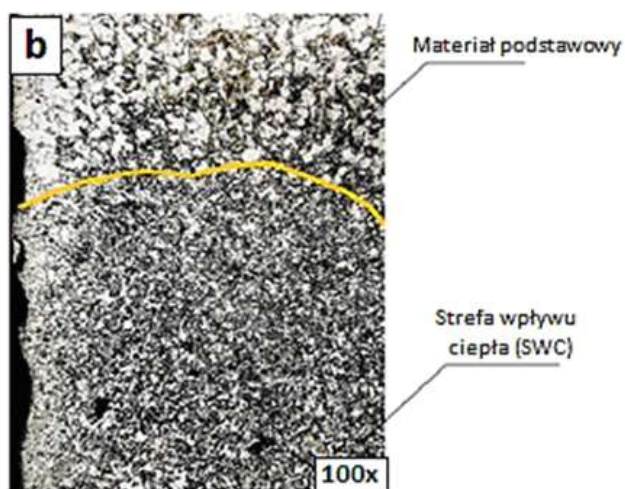
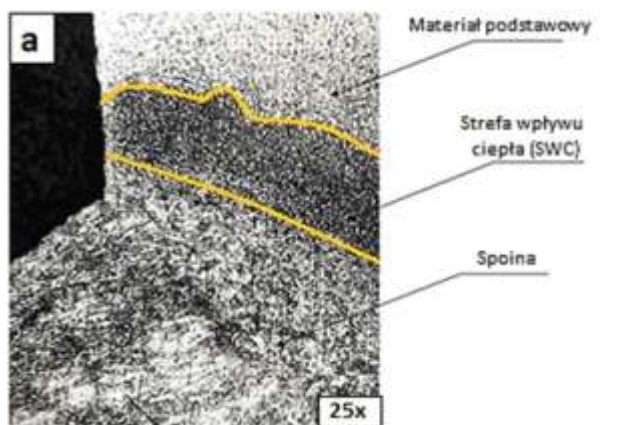
3. Dyskusja

Próbki pobrane z rury $\phi 159 \times 14,2$ mm wykonanej z materiału 13CrMo4-5 podczas badania wytrzymałości na rozciąganie uzyskały niższe wartości maksymalnego granicznego naprężenia R_m (451-453MPa) od wartości podanych w atescie, która wynosi 466MPa, jednak wartość ta mieści się w przedziale od 440 do 590 MPa określonym dla tego materiału przez normę PN-EN 10216-2:2009.

Tablica 4. Wyniki badania składu chemicznego

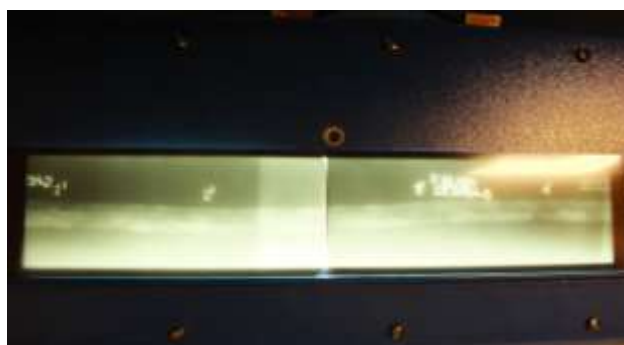
Table 4. The results of the study of the chemical composition

Methode: Fe-01-M		18.06.2013 15:38:10						
Kommentar: Fe - Orientierung		124485/07						
Einzelabluefung(en)		Elemente: Konzentrationen						
Proben Nr.:		Werkstoff:						
Bemerkung:		Kurzname:						
Nr	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.161	0.213	0.473	0.0078	0.0024	0.80	0.029	0.486
2	0.156	0.212	0.475	0.0080	0.0021	0.80	0.030	0.484
3	0.164	0.214	0.478	0.0088	0.0029	0.80	0.031	0.462
Nr	Al	Cu	Co	Ti	Nb	V	W	Pb
%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.011	0.018	0.0057	<0.0005	<0.0040	<0.0010	<0.0070	<0.0020
2	0.012	0.019	0.0050	<0.0005	<0.0040	<0.0010	<0.0070	<0.0020
3	0.012	0.019	0.0065	<0.0005	<0.0040	<0.0010	<0.0070	<0.0020
Nr	Mg	B	Sb	Sn	Zn	As	Bi	Ta
%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0010	0.0007	<0.0025	0.0046	0.0033	0.010	<0.0015	<0.010
2	0.0011	0.0007	<0.0025	0.0046	0.0030	0.0071	<0.0015	<0.010
3	0.0014	0.0009	0.0027	0.0046	0.0029	0.013	<0.0015	<0.010
Nr	Ca	Ce	Zr	La	Se	N	Fe	
%	%	%	%	%	%	%	%	
1	0.0017	<0.0020	<0.0015	<0.0005	<0.0020	0.0060	97.8	
2	0.0016	<0.0020	<0.0015	0.0006	<0.0020	0.0055	97.8	
3	0.0018	<0.0020	<0.0015	<0.0005	<0.0020	0.0056	97.8	



Rys. 6. Zdjęcia mikroskopowe próbki stali 13CrMo4-5 pobranych: z króćca w powiększeniu 25 razy (a), 100 razy (b) oraz z rury w powiększeniu: 200 razy (c), 500 razy (d) [5]

Fig. 6. Microscopic photographs of the 13CrMo4-5 steel samples acquired from: the connector enlarged 25 times (a) and 100 times (b), and the pipe enlarged 200 times (c) and 500 times (d) [5]



Rys. 7. Zdjęcia radiograficzne króćca φ159×14,2 mm [5]

Fig. 7. Radiographic photos of the connector φ159 × 14.2 mm [5]

Dla próbek pobranych z króćca φ159×14,2 mm wartości naprężenia granicznego wytrzymałości na rozciąganie podane w atęście jak i w Polskiej Normie są spełnione. Co więcej, podczas rozciągania materiału ze spoiną zerwanie stwierdzono w materiale podstawowym, co świadczy o dobrze dobranej

technologii spawania oraz o bardzo dobrej spawalności badanego materiału. Podczas próby zginania nie ujawniono wad materiałowych zarówno w króćcu jak i rurze. Twardość próbki pobranej z rury wyniosła $147 \pm 7,67$ HV10. Badania twardości na próbce pobranej z króćca wykazały, że wprowadzenie ciepła w materiał zmienia jego strukturę, co ma znaczący wpływ na twardość materiału. Świadczą o tym wyniki średniej arytmetycznej materiału spawanego gdzie dla pierwszej linii pomiarowej wyniosły one 228,4 HV10, natomiast dla drugiej linii – 198,4 HV10. Struktura materiału nowego wyrobu jest prawidłowa. Badania mikroskopowe nie wykazały żadnych zmian w strukturze materiałowej. Badania mikrostruktury wykonane na próbkach pobranych z króćca ukazują, iż struktura materiału różni się od struktury spoiny. Materiał ma strukturę ferrytyczno-bainityczną, natomiast spoina: bainityczno-perlityczną. Skład chemiczny zbadany nie odbiega od składu zawartego w atęcie dołączonym do materiału. Badania radiograficzne nie wykazały żadnych wskazań niedopuszczalnych dla króćca. Spoina była wyceniana według normy PN-EN 5817. Jakość ocenianej spoiny spełnia wymagania dla spoiny klasy B według normy PN-EN 5817.

4. Wnioski

1. Przebadane próbki stali 13CrMo5-4 pobrane z rury $\phi 159 \times 14,2$ mm oraz z króćca $\phi 159 \times 14,2$ mm spełniają normy materiału o podwyższonej odporności na temperaturę.
2. Właściwości mechaniczne i chemiczne próbek stali są zgodne z porównywanym atestem.
3. Łączenie stali przy użyciu metody spawania nie wpływa znacząco na jej właściwości mechaniczne jednak zmienia jej właściwości strukturalne oraz twardość w strefie wpływu ciepła (SWC) zahartowując materiał.

5. Podziękowania

Autorzy dziękują Prof. Gregorowi Moriemu z Montanuniversität Leoben (Austria) za zbadanie składu chemicznego stali 13CrMo4-5 oraz inż. Łukaszowi Klasie za wykonanie badań wytrzymałościowych oraz metalograficznych.

Bibliografia

1. Gnutek Z., Kordylewski W., *Maszynoznawstwo energetyczne*. Oficyna Wyd. PWR, Wrocław, 2003.
2. Gundlach W.R., *Podstawy maszyn przepływowych i ich systemów energetycznych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2007.
3. <http://kolana-hamburskie.pl/gatunki-stali/13crmo4-5/>.
4. <http://www.bth.pl/dane-techniczne/zastosowanie-stali-nierdzewnych/>.
5. Klasa Ł., *Badanie własności mechanicznych i elektrochemicznych stali 13CrMo4-5*. Praca inżynierska. Koszalin 2013, promotor Krzysztof Rokosz, recenzent: Tadeusz Hryniewicz, konsultant: Jan Valiček.
6. PN-EN ISO 6892-1:2010, *Metale – Próba rozciągania, część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej*.
7. PN-EN 910: 1999, *Badania niszczące spawanych złączy metali. Próby zginania*.
8. PN-EN ISO 6507 – 1:2007. *Metale – Pomiar twardości sposobem Vickersa*.
9. Błażewski S., Mikoszewski J., *Pomiary twardości metali*. WNT, Warszawa, 1981.
10. Głowacka M., Zieliński A., *Podstawy materiałoznawstwa*. Politechnika Gdańska, 2011.
11. Ciszewski A., Kalinowski L., Łobzowski J., Radomski T., *Metalografia stalowych złączy spawanych*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1966.
12. Jezierski G., *Radiografia przemysłowa*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Fundacja „Książka Naukowo-Techniczna”, Warszawa, 1993.
13. Beszta K., Jezierski G., *Metody radiologiczne*. Wydawnictwo Agencja Reklamowo-Wydawnicza, Opole, 1999.
14. Szczepaniak W., *Metody instrumentalne w analizie chemicznej*. Wydawnictwa Naukowe PWN, 2002, 2011.

Mechanical properties of steel 13CrMo4-5

Abstract

The article presents the research results of steel 13CrMo4-5 due to the mechanical and chemical properties. The tested material is mostly used to produce high pressure steam pipelines in heat and power plants. The studies were performed on 13CrMo4 steel pipe with a diameter of $\phi 159$ mm and a thickness of 14.2 mm. There were performed following analyses: the tensile test, flexural bending, test of hardness, microstructure examination and chemical composition. The average of the stress limit in a tensile test is 452 MPa. The samples were undergone flexural bending angle of 180° . The hardness measured for the above-mentioned steel was 147 ± 7.67 HV10. The studies have shown the microstructure of the material as ferritic-bainitic structure. Article illustrates the research that can be used for quality control of newly made products as well as in avoidance of products which do not fulfill the standards

Key words: stainless steel 13CrMo4-5, strength tests, tensile test, bending test, metallography, corrosion resistance, radiography.

Autorzy:

Prof. nzw. dr hab. inż. **Krzysztof Rokosz** – Politechnika Koszalińska

Prof. dr hab. inż. **Tadeusz Hryniewicz** - Politechnika Koszalińska

Mgr inż. **Sławomir Rzakiewicz** - Politechnika Koszalińska