

Agata Wieczorska, Norbert Abramczyk
 Gdynia Maritime University (Uniwersytet Morski w Gdyni)

DEVELOPING TECHNOLOGY FOR THE WELDING OF STEAM TURBINE STEERING DIAPHRAGMS USING THE SUBMERGED ARC WELDING METHOD

Opracowanie technologii wykonania spoin tarcz kierowniczych turbin parowych z wykorzystaniem metody spawania łukiem krytym

Abstract: *The production process of steam turbine steering disks requires many welded joints of high quality parameters. The article presents the test results obtained in the welding process of elements made of martensitic steel X11CrMo12-1 with a thickness of 160 mm. During the tested process, a weld was made with a welding wire filling with 1% and 9% chromium in the K geometry, a groove height of 65 mm and without full penetration. The research was carried out on a butt joint in a downward position. The joint was subjected to destructive and non-destructive tests, including macroscopic tests. This work was aimed at determining the optimal welding parameters, influencing the improvement of the properties and quality of the joint..*

Keywords: Submerged Arc Welding, steam turbine, optimization

Streszczenie: *Proces wytwarzania tarcz kierowniczych turbin parowych wymaga wykonania wielu połączeń spawanych o wysokich parametrach jakościowych. W artykule przedstawiono wyniki badań otrzymane w procesie spawania elementów wykonanych ze stali martenzytycznej X11CrMo12-1 o grubości 160 mm. W trakcie badanego procesu wykonano spoinę z wypełnieniem drutem spawalniczym o zawartości 1% i 9% chromu w geometrii K, wysokości rowka 65 mm i bez pełnego przetopu. Badania zostały przeprowadzone na połączeniu doczołowych w pozycji podolnej. Złącze poddano badaniom niszczącym i nieniszczącym, w tym badaniom makroskopowym. Praca miała na celu określenie optymalnych parametrów spawania, wpływających na podniesienie właściwości i jakości wykonanego złącza.*

Słowa kluczowe: spawanie łukiem krytym, turbina parowa, optymalizacja

1. Introduction

The production process of steam turbine steering disks requires many welded joints of high quality parameters [1]. The technology of manufacturing the elements in question requires the use of deep welds with a small bevel angle on the walls of the welding groove. Performing this type of connection by hand is limited and problematic due to the difficult position of the welding and the difficult access to the place of the weld. The result of such limitations will be a reduction in the quality of the connections made and a significant probability of the emergence of a number of welding defects. In view of the above, it is more advantageous to use an automated welding process to make such connections. A very advantageous choice will be the submerged arc welding method, which is characterized by a mechanized welding process, high efficiency and no emission of harmful gases during the weld process. An additional advantageous parameter of this method is the possibility of making welds up to 200 mm deep, fig. 1 shows a submerged arc welding station from FANUC-Robot M900iA, on which a submerged arc welding test was performed on elements (plates) made of steel type X11CrMo12-1, 160 mm thick. The welding test was performed in a friendly company that deals with the production of elements for steam turbines and their overhauls and repairs [4,8,9,10,13].

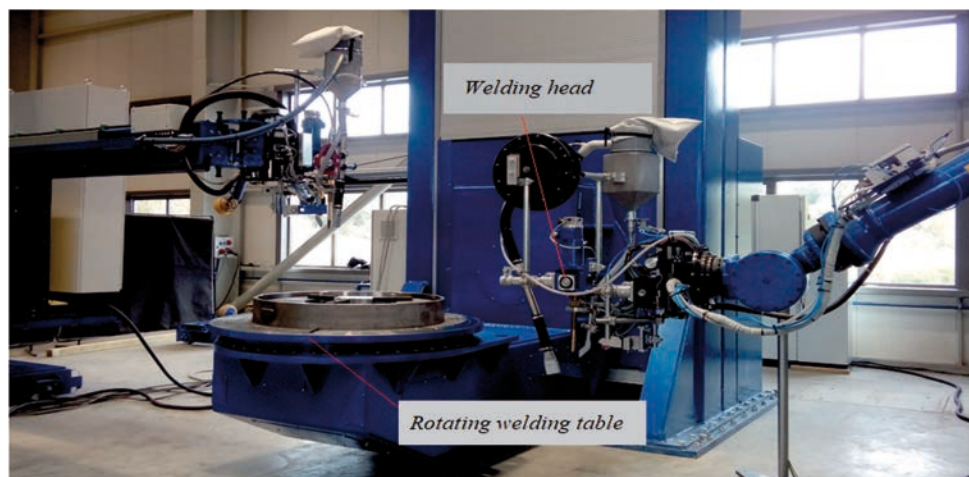


Fig. 1. FANUC-Robot M900iA submerged arc welding station

When joining high-alloy steels with the content of elements increasing the mechanical properties (including chromium, molybdenum, vanadium and tungsten), precisely matched welding materials should be used [7]. This is due to the need to ensure the chemical composition and mechanical parameters in the joint that are closest to the properties of the joined elements (parent material). It means meeting at least the same requirements as the

combined materials. In this case, welding technologies for specific materials are developed taking into account the precise control of welding parameters and heat treatment [2,3].

The basic conditions for the correct welding of elements are:

- Heat treatment before and after welding, i.e. heating the material before welding and relieving the stresses arising during welding, allows to prevent the formation of cracks,
- The method of preparing the bonded elements, i.e. the use of appropriate bevelling angles (geometry) of the welding groove, cleaning the joint area of flame-retardant oxides,
- Compliance with the technology and maintaining the correct parameters of the welding process [5].

The design of the steering discs and the size of the elements to be welded dictate the geometry of the welding groove in the form of a double K-type butt weld with no complete penetration between the two sides. An example of such a connector is shown in fig. 2.

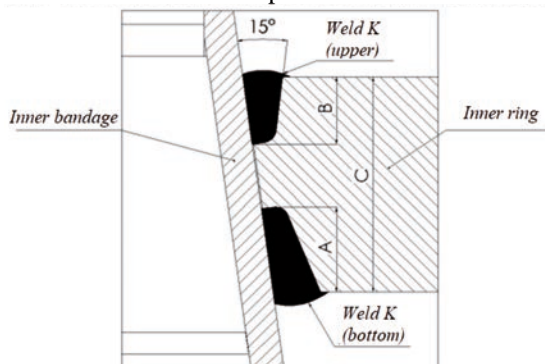


Fig. 2. The figure shows the butt weld K for an example of a steering disk

2. Preparation of the sample for testing

The steering disk welding technology assumes the determination of the method by which the joints are to be made [12]. In our case, we adopted the method of submerged arc welding (process 121 - SAW-submerged arc welding), which in turn imposed the position of the weld (flat PA with a bevel of 0-15°). As a result of the analysis of the shield structure, we determined the type of joint, the height of the sample to be welded and the base material, where in our case it was a K-type front joint with incomplete penetration (BW). The height of the sample for welding was proportional to the height of the shield and was 160 mm, the height of the groove 65 mm, Fig. 3b, and the basic material from which the elements for the welding test were made were steel plates of the X11CrMo12-1 grade.

When starting and stopping welding, there is a temporary instability of the process, which causes that the weld in these places does not have the required properties. To maintain the homogeneity of the joint along the entire length of the joint, run-out plates are used at the beginning and at the end of the joint, as shown in fig. 3a.

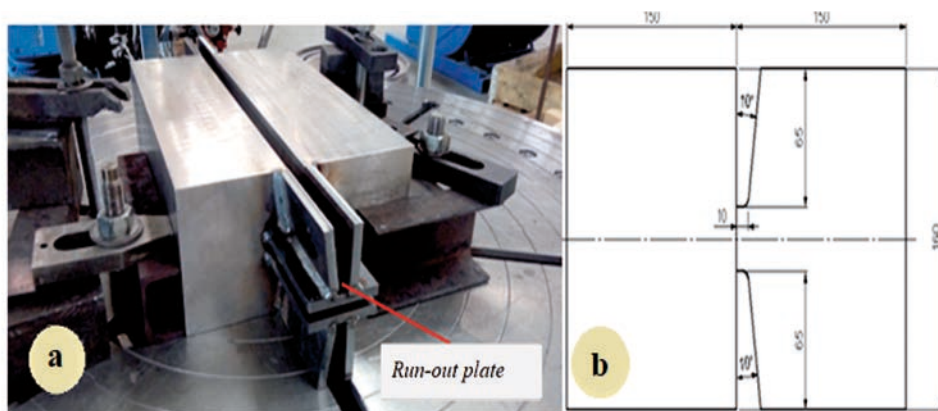


Fig. 3. Preparation of elements for submerged arc welding test. a) Elements (plates) prepared for welding (with run-out plates); b) Schematic cross-section of elements connected with the submerged arc welding method

When starting the development of the technology of joining the steering discs elements, a two-stage filling of the grooves with welds made with the use of wire was assumed:

- $\varnothing 4$ mm, BA-S2CrMo1 type according to [14], to fill the groove in 80 ÷ 90% of its depth,
- $\varnothing 4$ mm, type BA-SCrMo9 according to [14] until the groove is completely filled.

When developing the technology of manufacturing steering discs, the elements of their interior are to be joined by welding with a wire containing 1% Cr. Welds welded with this wire have a lower tendency to crack in the initial phase of the connection. In the final layers, a wire with a content of 9% Cr is used as a weld metal, which in terms of chemical composition is compatible with the parent material and has sufficient strength properties for the environment in which the steering disk works. An example of the division of the welding groove is shown in fig. 4. The developed technology assumed equal stresses on both sides of the sample, i.e. first weld 2-3 layers on one side, then weld the other side to fill the groove completely, then return to the first side and fill the rest of the groove. Table 1 presents basic material data and welding parameters [1.5].

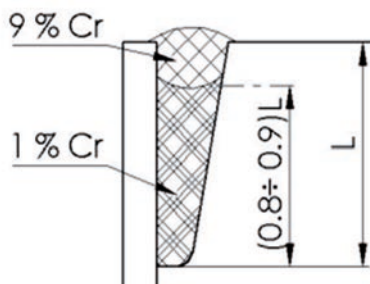


Fig. 4. Schematic cross section of a welded joint

Table 1

Material data and welding parameters

Welding process	121 (SAW)
Joint type	BW
Welding position	PA
Base material	X11CrMo12-1
Dimension of testing plates	2x150x160x450
Filler material	Ø4, BA-S2CrMo1 Ø4, BA-SCrMo91
Flux	BF10, SA FB 155 AC
Preheat temperature for 1% Cr	350°C , interpass temperature ok. 200°C
Preheat temperature for 9% Cr	350°C , interpass temperature ok. 250°C
Welding Current I [A]	580+620
Arc Voltage U [V]	30+32
Welding speed [cm/min]	35+65
Number of run	
1/side	25
2/side	25

Before welding, the elements were heated at 350°C in the POK-2 resistance-chamber furnace, then they were transported to the welding station where thermal blankets were used so that the elements did not cool down and the elements were heated with a gas burner, as shown in Figure 5. During welding, the temperature of each bead was measured using a Cyclops 160L pyrometer, the interpass temperature for the material with 1% Cr was about 200°C, while the temperature for the material with 9% Cr was about 250°C.

3. The research results

The joined plates were subjected to defectoscopy, non-destructive and destructive tests, including macroscopic tests, at the welding site. Visual, penetration and ultrasonic tests were carried out (fig. 5), and then the sample was subjected to heat treatment (stress relief annealing - fig. 6). No defects found.

Visual tests were carried out using a caliper and a joint gauge, the geometrical dimensions of the weld were measured. The weld was checked with a magnifying glass for the occurrence of cracks, undercuts, fillings in the weld groove, pores, overhangs, and leaks. Visual examination did not reveal any inconsistencies. The level of acceptance of the quality of weld B was found. The tests were carried out in accordance with the standard [17]. Then the sample was subjected to penetrant testing according to [17,18]. Penetration test was carried out on the entire surface of the joint at the background illumination intensity of 980 lx using the Helling set. The welded joint, based on penetration tests, also obtained the weld class B, with a positive result.



Fig. 5. Examination of the sample with the ultrasonic method: 1) 45 ° angle head, 2) A straight head

The ultrasonic test was carried out using the SONATEST 350M apparatus, the heads with the beam at an angle were used to test the integrity of the welds, because during the inspection of the welds it is required to direct the sound waves at an angle and the straight test heads which allow for the detection and dimensioning of delaminations, table 2 presents the results of the test with the method ultrasonic. The tested sample obtained a positive result, obtaining the weld class B in accordance with the standard [17]. Quality level B corresponds to the highest requirements for joints.

Table 2

Ultrasonic examination results

Instrument: SONATEST 350M		Extent of testing acc to:			Instructions [11,15,16,17]	
Couplant: Oil		100% accessible surface				
Method: DAC curve / DAK-kurve		100% of welding+ HAZ				
Probe		Calibration			Test setting	
Type	MHz	Ref. block No.	Ref. sensitivity [db]	Ref. distance [mm]	Testing sensitivity [db] øSDH [mm]	
SMA4-45ZR	4	No.2	27	25	55	1,5

SMA4-70ZR	4	No.2	29	25	57	1,5
SMA4-60ZR	4	No.2	29	25	59	1,5
Test result: No recordable indications						

After non-destructive testing, the run-out plates were cut off and then the sample was stress-relieved in order to get rid of post-welding stresses without changing the steel structure [6]. The heat treatment was carried out in the DLR-61 chamber electric furnace. The heating speed of the sample was 40°C/h, then after reaching the temperature of 680°C, the holding time was 4.5 hours, and then the sample was cooled down at the rate of 55°C/h.



a)

STRESS RELIEVING	
Heating rate	40°C/h
Holding temperature	680°C
Holding time	4,5 h
Cooling rate	55°C/h

b)

Fig. 6. a) Sample after heat treatment (stress relief annealing); b) Parameters of the stress relieving annealing process of the test specimen

After the thermal treatment, the sample was subjected to destructive tests. The destructive tests carried out include:

- transverse tensile test
- transverse bend test
- impact test
- hardness test
- macroscopic examinations

Therefore, appropriate separation of samples for destructive testing was started (fig. 7).

Samples for the tensile test were taken from the entire cross-section of the joint, of which the samples from zone C, that is without penetration, are not taken into account in the final results. The samples for testing the impact strength of the joint were taken so that it was possible to cut a wedge at the point of the weld and in the heat affected zone. The bend test specimens were separated from the entire section, excluding the area without penetration.

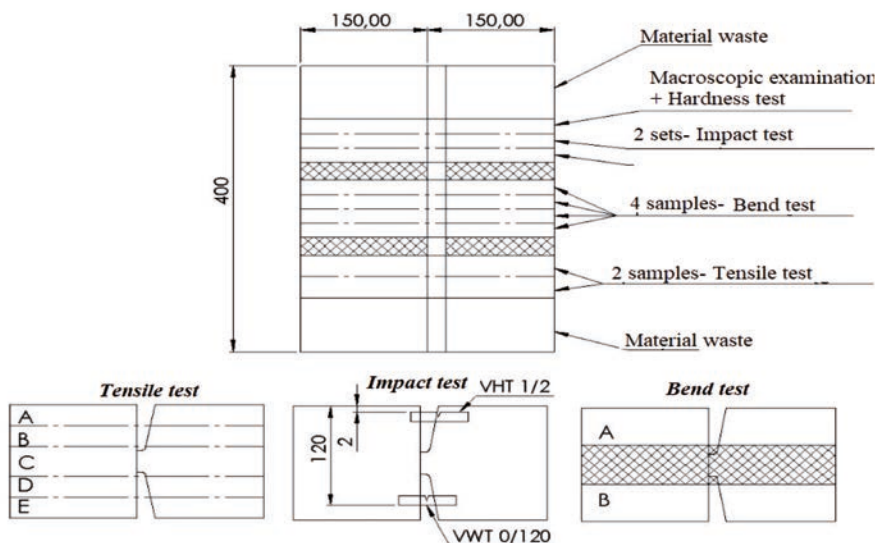


Fig. 7. Separation of samples for strength tests

Table 3 shows the results of the tensile strength tests. The highest force obtained during the test was $F_m = 478$ k, for which the value of the ultimate tensile stress was $R_m = 642$ N/mm.

Table 3

The results of tensile test of welded joint (tensile strength)

Data	Tensile test acc. to		[19]			
	Apparatus:		ZD100			
	Tensile speed:		25 MPa/s			
Results	Piece dimension [mm]		F _m	R _m	Place of rupture	
	axb		kN	N/mm ²		
		25,0	29,3	439	593	Weld
		25,0	29,5	468	635	Weld
		24,8	35,9	332	373	*
		24,9	27,9	434	625	Weld
		25,0	28,9	436	603	Weld
		24,8	28,8	430	602	Weld
		25,1	28,7	450	625	Weld
		25,2	34,3	267	309	*
	24,9	29,9	478	642	Weld	
	25,2	28,9	432	593	Weld	
Requirements:			---	≥551	---	

Figure 8 shows the samples after the transverse bend test, while table 4 shows the results of the test bend test of welded joint, where the positive result was obtained.

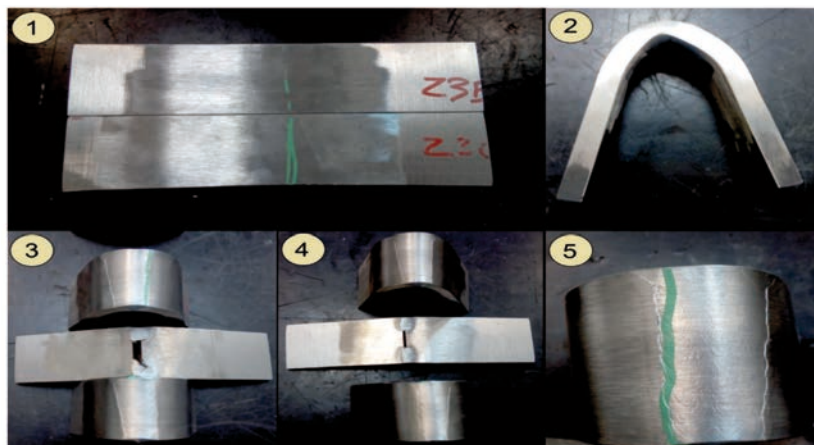


Fig. 8. Samples after the transverse bend test. 1) Condition of samples prior to testing; 2) Sample after bending. 3) Test specimens with a visible bend line on the fusion line of the straight wall of the weld groove; 4) Samples after the test with visible bend line in the axis of the weld; 5) Sample after magnification examination

Uneven distribution of deflection is observed, which is the result of the lower hardness of weld material compared to the parent material.

Table 4

The results of the test bend test

Data	Bend test acc. to:		[20]		
	Scope test to:		[21]		
	Ambient temperature:		23±25°C		
Results	Piece dimension [mm]	Bending conditions [mm]	Rollers span [mm]	Type and symbol of bend	Results
	10x50	d=40 α=180°	65	SBB	Satisfactory
	10x50	d=40 α=180°	65	SBB	Satisfactory
	10x50	d=40 α=180°	65	SBB	Satisfactory
	10x50	d=40 α=180°	65	SBB	Satisfactory
	10x50	d=40 α=180°	65	SBB	Satisfactory
	10x50	d=40 α=180°	65	SBB	Satisfactory
	10x50	d=40 α=180°	65	SBB	Satisfactory

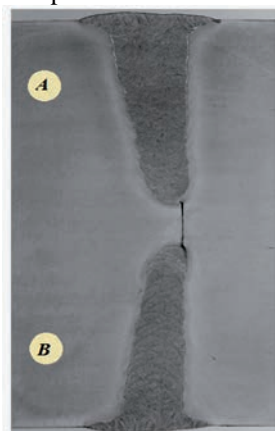
Table 5 shows the results of the impact tests. The average value for six samples taken from the weld (VWT0 / 2 and VWT0 / 120) is 207 [J]. The mean value for the three samples taken from the SWC (VHT1 / 2 and VHT1 / 120) is 104.5 [J]. The minimum breaking work for X11CrMo12-1 steel is 27 [J]. Test result: positive.

Table 5

Results of impact tests

Data	Impact test acc.to:		[22]				
	Apparatus:		ZWICK 5111				
Results	Test pos.	Type: KV ₂ /J				Temp.	
		1	2	3	Aver	23°C	
	VWT0/2	228	223	242	231	23°C	
	VHT1/2	72	37	168	92	23°C	
	VWT0/120	187	188	173	183	23°C	
	VHT1/120	59	152	140	117	23°C	
Requirements:						≥27	---

The result of MA tests (macroscopic) and the sample are shown in fig. 9. The test result was positive.



Data	Test standards and instructions		[23]			
	Test equipment		STEMI 2000C			
	Testing specification magn.		x2:100			
	Testing specification etch.		Ma11Fe			
	Test classification defects		[24]			
Results	SIDE	No. DEFECTS	Name of defects	Symbol	Size [mm]	Notes
	A	-	No defects were found	-	-	-
	B	-	No defects were found	-	-	-

Fig. 9. Macroscopic examination of the X11CrMo12-1 sample and the test results

The hardness measurement tab. 6, results do not exceed the values above 320 HV. The difference between a trailer with weld hardness and the lowest hardness of the parent may not be 100 HV. In this case, the weld has lower hardness than the parent material. The biggest difference between the two centres is 34 HV.

Table 6

HV test results (hardness)

Data	Test standards and instructions:		[25,26]		
	Test equipment:		Zwick 3212		
Load		98.1 N			
Locating of hardness measurements at area of the welded joint					
Results	Weld A	Location	Area	Hardness HV10	
				Line I	Line II
		Basic material	1	211 213 222	213 214 219
		Heat affected zone	2	271 269 246,235,272	239 254 228,229,267
		Weld	3	201 199 193	213 215 221
		Heat affected zone	4	236,251,231 263 257	264,246,245 241 201
	Basic material	5	214 216 219	222 224 224	
	Weld B	Basic material	1	224 216 221	224 227 220
		Heat affected zone	2	256 265 263,268,267	220 253 262,270,269
		Weld	3	200 198 203	213 209 210
		Heat affected zone	4	261,255,251 260 251	258,257,256 254 202
		Basic material	5	214 215 218	221 224 220

4. Conclusions

The technology of manufacturing steam turbine steering disks imposes the use of deep welds with a small bevel angle on the welding groove walls. The submerged arc welding method is ideal for welding this type of joint. The advantage of this technique is a fully mechanized welding process, high efficiency, no harmful gases, and with this technique, you can weld joints up to 200 mm deep. The introduction of the submerged arc welding method will significantly improve work and shorten the production time. Properly conducted process is more effective than manual welding methods, and generates fewer welding defects. The work of breaking for the mean value for six samples taken from the weld (VWT0 / 2 and VWT0 / 120) is 207 [J]. The mean value for the three samples taken from the SWC (VHT1 / 2 and VHT1 / 120) is 104.5 [J]. The minimum breaking work for X11CrMo12-1 steel is 27 [J], which is in accordance with the requirements. The introduction of the method is also connected with the obligation to qualify the welding procedure. It is a tedious and time-consuming process, as the submerged arc welding method is not used on a large scale compared to other welding methods, which means that the technology is independently developed in the absence of available resources to help you master the process and determine the correct parameters. This work was aimed at determining the optimal welding parameters, influencing the improvement of the properties and quality of the joint.

5. References

1. Cecotka M., Wnuk M.: Zastosowanie metody spawania wąskoszczelinowego w energetyce. Przegląd Spawalnictwa 7/2014.
2. Gawroniak N.: Podstawy spawalnictwa. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2004.
3. Gundlach W. R.: Turbiny parowe przełomu wieków, praca IMP PŁ, Łódź 2003
4. Gundlach W. R.: Podstawy maszyn przepływowych i ich systemów energetycznych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne PWN 2008
5. Ojrzyński M.: Sposób wytwarzania tarczy kierowniczej turbiny parowej. Opis patentowy PL210537B1. Urząd patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Elbląg 2006.
6. Pilarczyk J. :Poradnik Inżyniera Spawalnictwo, tom II. Wydawnictwa NaukowoTechniczne. Warszawa 2005.
7. Sadowski Ł.: Zastosowanie najnowszych stali dla parametrów nadkrytycznych
8. h w blokach energetycznych. Paliwa i Energetyka 3/2015 [14].
9. Wieczorska A., Domżański R.: THE INFLUENCE OF SUBMERGED ARC WELDING CONDITIONS ON THE PROPERTIES OF S355JR STRUCTURAL STEEL JOINTS,2021, pp. 19-29.

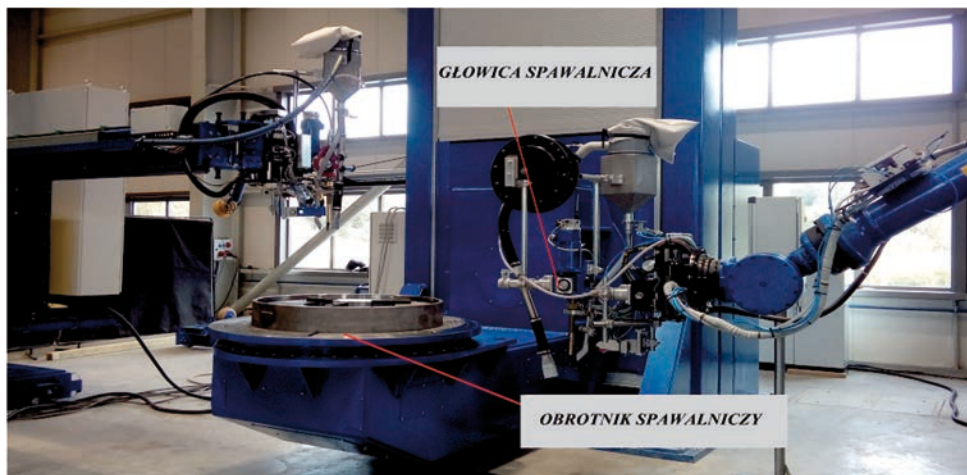
10. Charakterystyka spawania łukiem krytym (saw)<https://spawalnicy.pl/edukacja/57-charakterystyka-spawania-lukiem-krytym-saw> (dostęp 8.06.2022)
11. Spawanie łukiem krytym SAW. <http://www.e-spawalnik.pl/?spawanie+lukiem+krytym-saw,106> (dostęp 9.06.2022)
12. PN- EN ISO 15614 (1-13) „Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali- Badanie technologii spawania”
13. PN-EN 24063 „Spawanie, zgrzewanie i lutowanie metali -Wykaz metod i ich oznaczenia numeryczne stosowane w umownym przedstawianiu połączeń na rysunkach”
14. PN-EN 10088 „Stale odporne na korozję - Część 1: Wykaz stali odpornych na korozję”
15. PN-EN ISO 14171 „Materiały dodatkowe do spawania - Druty elektrodowe lite, druty elektrodowe proszkowe i kombinacje elektroda/topnik do spawania łukiem krytym stali niestopowych i drobnziarnistych – Klasyfikacja”
16. PN-EN ISO 16810 „Badania nieniszczące - Badania ultradźwiękowe - Zasady ogólne”
17. PN-EN ISO 16811 „Badania nieniszczące - Badania ultradźwiękowe - Nastawianie czułości i zakresu obserwacji”
18. PN-EN ISO 5817 „Spawanie -Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką) -Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych”
19. PN-EN ISO 3452-1:2021-12 „Badania nieniszczące spoin - Badania penetracyjne - Poziomy akceptacji ”
20. PN-EN ISO 4136:2013-05 „Badania niszczące złączy spawanych metali -Próba rozciągania próbek poprzecznych”
21. PN-EN ISO 5173:2010/A1:2012 „Badania niszczące spoin w materiałach metalowych -Badanie na zginanie”
22. PN-EN ISO 15614-1:2017 „Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali -Badanie technologii spawania”
23. PN-EN ISO 9016:2013-5 „Badania niszczące złączy spawanych metali -Badanie udarności - Usytuowanie próbek, kierunek karbu i badanie”
24. PN-EN ISO 17639:2013-12 „Badania niszczące spawanych złączy metali -Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych”
25. PN-EN ISO 6520-1:2009 „Spawanie i procesy pokrewne - Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach”
26. PN- EN ISO 6507-1:2007 „Metale -- Pomiar twardości sposobem Vickersa -Część 1: Metoda badania”
27. PN-EN ISO 9015-1:2011 „Badania niszczące złączy spawanych metali - Badanie twardości - Część 1: Badanie twardości złączy spawanych łukowo”

OPRACOWANIE TECHNOLOGII WYKONANIA SPOIN TARCZ KIEROWNICZYCH TURBIN PAROWYCH Z WYKORZYSTANIEM METODY SPAWANIA ŁUKIEM KRYTYM

1. Wstęp

Proces wytwarzania tarcz kierowniczych turbin parowych wymaga wykonania wielu połączeń spawanych o wysokich parametrach jakościowych [1]. Technologia wykonywania tych elementów narzuca konieczność stosowania głębokich spoin o małym kącie ukosowania ścianek rowka spawalniczego. Wykonanie tego rodzaju połączeń metodą ręczną jest ograniczone i problematyczne z uwagi na trudną pozycję spawania i trudny dostęp do miejsca wykonywania spoiny. Skutkiem tego rodzaju ograniczeń będzie obniżenie jakości wykonywanych połączeń i znaczne prawdopodobieństwo powstawania wad spawalniczych. Z uwagi na powyższe do wykonywania tego rodzaju połączeń korzystniejsze jest zastosowanie zautomatyzowanego procesu spawania. Bardzo korzystnym wyborem będzie metoda spawania łukiem krytym, która charakteryzuje się zmechanizowanym procesem spawania, dużą wydajnością i brakiem wydzielania szkodliwych gazów w trakcie wykonywania spoiny. Dodatkowym atutem tej metody jest możliwość wykonywania spoin o głębokości do 200 mm. Rysunek 1 przedstawia stanowisko do spawania łukiem krytym (SAW-submerged arc welding) firmy FANUC-Robot M900iA, na którym wykonano próbę spawania łukiem krytym elementów (płyt) wykonanych ze stali typu X11CrMo12-1 o grubości 160 mm. Próba spawania została wykonana w zaprzyjaźnionej firmie, która zajmuje się produkcją elementów do turbin parowych oraz ich remontami i naprawami [4,8,9,10,13].

Przy łączeniu stali wysokostopowych o zawartości pierwiastków podwyższających własności mechaniczne (m.in. chrom, molibden, wanad i wolfram) należy stosować precyzyjnie dopasowane materiały spawalnicze [7]. Wynika to z potrzeby zapewnienia w spoinie składu chemicznego i parametrów mechanicznych najbardziej zbliżonych do własności łączonych elementów (materiału rodzimego). Chodzi o spełnienie co najmniej tych samych wymagań co w przypadku materiałów łączonych. W takiej sytuacji technologie spawania konkretnych materiałów są opracowywane z uwzględnieniem dokładnej kontroli parametrów spawania i obróbki cieplnej [2,3].

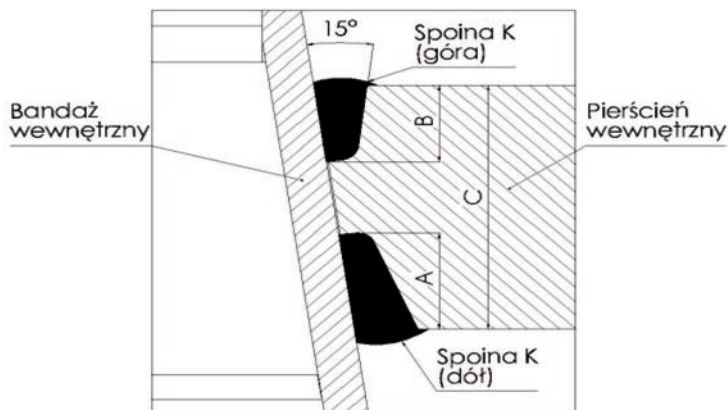


Rys. 1. Stanowisko do spawania łukiem krytym firmy FANUC -Robot M900iA

Podstawowymi warunkami prawidłowego zespawania elementów są:

- obróbka cieplna przed spawaniem i po nim, czyli wygrzanie materiału przed spawaniem i odprężanie powstałych w trakcie spawania naprężeń pozwala zapobiec powstawaniu pęknięć;
- sposób przygotowania spajanych elementów, czyli zastosowanie odpowiednich kątów ukosowania (geometrii) rowka spawalniczego, oczyszczenie miejsca złącza z trudnotopliwych tlenków;
- stosowanie się do technologii i utrzymanie poprawnych parametrów procesu spawalniczego [5].

Konstrukcja tarcz kierowniczych oraz wielkość spawanych elementów narzuca geometrię rowka spawalniczego w postaci podwójnej spoiny czołowej typu K z brakiem przetopu całkowitego pomiędzy dwiema stronami. Przykład takiego złącza przedstawia rys. 2.

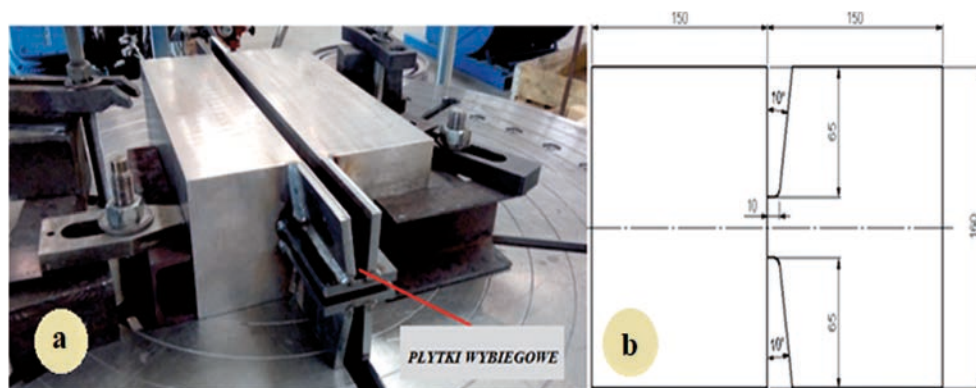


Rys. 2. Połączenie elementów spoiną czołową typu K

2. Przygotowanie próbki do badań

Technologia spawania tarcz kierowniczych zakłada określenie, jaką metodą złącza będą wykonywane [12]. W omawianym przypadku przyjęto metodę spawania łukiem krytym (proces 121 – SAW-submerged arc welding), co z kolei narzuciło pozycję wykonania spoiny (podolną PA z ukosowaniem o kącie 0-15°). W wyniku przeprowadzonej analizy konstrukcji tarczy określono typ złącza, wysokość próbki do spawania oraz materiał podstawowy, gdzie w tym przypadku było to złącze czołowe typu K z niepełnym przetopem (BW). Wysokość próbki do spawania była proporcjonalna do wysokości tarczy i wynosiła 160 mm, wysokości rowka 65 mm, rys. 3b, a materiał podstawowy, z którego wykonano elementy do próby spawania, to płyty stalowe w gatunku X11CrMo12-1.

W czasie rozpoczynania i kończenia spawania występuje chwilowa niestabilność procesu, powodująca, że spoina w tych miejscach nie ma wymaganych właściwości. Dla zachowania jednorodności spoiny na całej długości złącza stosuje się płytki wybiegowe na początku i na końcu złącza, co obrazuje rys. 3a.



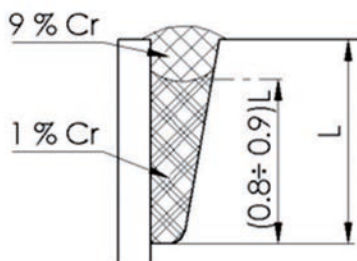
Rys. 3. Przygotowanie elementów do próby spawania łukiem krytym. a) Elementy (płyty) przygotowane do spawania (z widocznymi płytkami wybiegowymi); b) Schematyczny przekrój poprzeczny elementów łączonych doczołową metodą spawania łukiem krytym

Przystępując do opracowania technologii łączenia elementów tarcz kierowniczych założono dwuetapowe wypełnianie rowków spoinami wykonanymi z wykorzystaniem drutu:

- \varnothing 4 mm, typu BA-S2CrMo1 według [14], do wypełnienia rowka w 80–90% jego głębokości,
- \varnothing 4 mm, typu BA-SCrMo9 według [14] do całkowitego wypełnienia rowka.

Opracowując technologię wytwarzania tarcz kierowniczych, przewidziano łączenie elementów ich wnętrza poprzez spawanie drutem o zawartości 1% Cr. Spoiny spawane tym drutem mają mniejszą tendencję do pęknięcia w początkowej fazie wykonania połączenia.

W końcowych warstwach jako stopiwa używa się drutu o zawartości 9% Cr, który pod względem składu chemicznego jest zgodny z materiałem rodzimym oraz ma wystarczające własności wytrzymałościowe na środowisko, w którym pracuje tarcza kierownicza. Przykładowy podział rowka spawalniczego zobrazowano na rys. 4. Opracowana technologia zakładała równomierne naprężenia z obu stron próbki, czyli należy spawać najpierw 2–3 warstwy z jednej strony, następnie spawać drugą stronę wypełniając rowek w pełni, potem powrócić do pierwszej strony i wypełnić resztę rowka. W tab. 1 zamieszczono podstawowe dane materiałowe i parametry spawania [1,5].



Rys. 4. Schematyczny przekrój poprzeczny połączenia spawanego

Tabela 1

Dane materiałowe i parametry spawania

Proces	121 (SAW)
Typ złącza	BW
Pozycja	PA
Materiał podstawowy	X11CrMo12-1
Wymiary płyty	2x150x160x450
Materiał wypełnienia (drut)	Ø4, BA-S2CrMo1 Ø4, BA-SCrMo91
Topnik	BF10, SA FB 155 AC
Wygrzanie materiału dla 1% Cr	Wygrzewać do 350°C w piecu, temperatura między ściegowa ok. 200°C
Wygrzanie materiału dla 9% Cr	Wygrzewać do 350°C w piecu, temperatura między ściegowa ok. 250°C
Natężenie [A]	580+620
Napięcie [V]	30+32
Prędkość spawania [cm/min]	35+65
Ilość ściegów :	
1/strona	25
2/strona	25

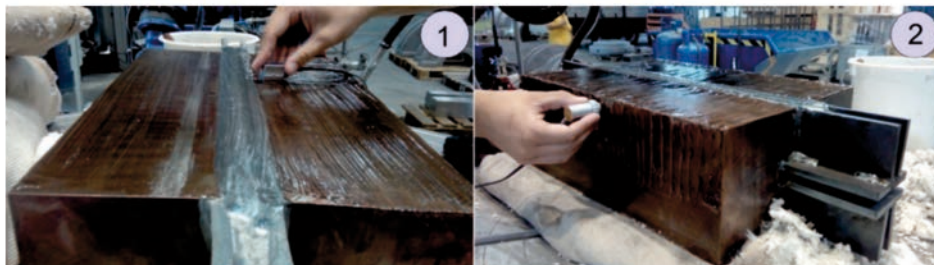
Przed przystąpieniem do spawania elementy zostały wygrzane w temperaturze 350° C w piecu oporowo komorowym POK-2, następnie zostały przetransportowane na stanowisko spawalnicze, gdzie zastosowano koce termiczne, aby elementy nie wystygły oraz dogrzewano elementy za pomocą palnika gazowego, co obrazuje rys. 5. Podczas spawania mierzono temperaturę każdego ściegu pirometrem firmy Cyclops 160L, temperatura

międzyściegowa dla materiału o zawartości 1% Cr wynosiła ok. 200° C, natomiast dla materiału o zawartości 9% Cr – ok. 250°C.

3. Wyniki badań

Połączone ze sobą płyty poddano w miejscu spawania badaniom defektoskopowym, nieniszczącym i niszczącym, w tym makroskopowym. Przeprowadzono badania wizualne, penetracyjne i ultradźwiękowe (rys. 5), a następnie poddano tę próbkę obróbce cieplnej (wyżarzaniu odprężającemu – rys. 6). Nie stwierdzono defektów.

Badania wizualne przeprowadzono za pomocą suwmiarki oraz spoinomierzem zmierzono wymiary geometryczne spoiny. Za pomocą lupy skontrolowano spoinę pod względem wystąpienia pęknięć, podtopień, niewypełnień rowka spawalniczego, porów, nawisów, wycieków. Badania wizualne nie stwierdziły żadnych niezgodności. Stwierdzono poziom akceptacji jakości spoiny B. Badania przeprowadzono zgodnie z normą [17]. Następnie próbkę poddano badaniom penetracyjnym według [17,18]. Badanie penetracyjne przeprowadzono na całej powierzchni spoiny przy natężeniu oświetlenia w tle 980lx z użyciem zestawu firmy Helling. Wykonane złącze spawane na podstawie badań penetracyjnych również uzyskało klasę spoiny B, z wynikiem pozytywnym.



Rys. 5. Badanie próbki metodą ultradźwiękową: 1) sondą z głowicą o kącie 45°; 2) sondą z głowicą prostą

Badanie ultradźwiękowe przeprowadzono z użyciem aparatury SONATEST 350M, wykorzystano głowicę z wiązką pod kątem do badania integralności spoin, ponieważ podczas inspekcji spoin wymagane jest skierowanie fal dźwiękowych pod kątem, oraz głowicę prostą, która pozwala na wykrywanie i wymiarowanie rozwarstwień, w tabeli 2 zamieszczono wyniki badania metodą ultradźwiękową. Badana próbka uzyskała wynik pozytywny – klasę spoiny B – zgodny z normą [17]. Poziom jakości B odpowiada najwyższymi wymogom wobec spoin.

Tabela 2

Wyniki badań metodą ultradźwiękową

Aparatura: SONATEST 350M		Obszar badania zgodny z:			Instrukcje/Normy [11,15,16,17]	
Środek sprzęgający: Olej		100% dostępnej powierzchni 100% spoiny +SWC(strefa wpływu ciepła)				
Metoda: DAC curve / DAK- kurve						
Głowica		Kalibracja			Ustawienia badania	
Typ	MHz	Wzorzec No.	Czułość wzorcowa [db]	Odległość wzorcowa [mm]	Czułość badania [db]	øSDH [mm]
SMA4-45ZR	4	No.2	27	25	55	1,5
SMA4-70ZR	4	No.2	29	25	57	1,5
SMA4-60ZR	4	No.2	29	25	59	1,5
WYNIK BADANIA: Brak zarejestrowanych wskazań.						

Po wykonaniu badań nieniszczących płytki wybiegowe zostały odcięte, a następnie próbkę poddano wyżarzaniu odpężającemu w celu pozbycia się naprężeń po spawaniu bez zmiany struktury stali [6]. Obróbka cieplna została przeprowadzona w piecu elektrycznym komorowym DLR-61. Prędkość nagrzewania próbki to 40°C/h, następnie po uzyskaniu temperatury 680°C czas wstrzymania wynosił 4,5 h, a następnie próbka została ostudzona z prędkością 55°C/h.



a)

Wyżarzanie odpężające	
Szybkość nagrzewania	40°C/h
Temperatura wyżarzania	680°C
Czas wyżarzania	4,5 h
Prędkość studzenia	55°C/h

b)

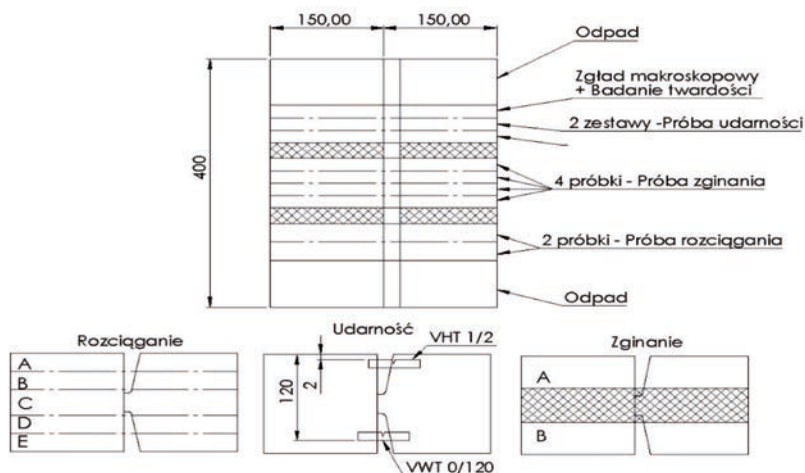
Rys. 6. a) Próbka po przeprowadzeniu obróbki cieplnej (wyżarzania odpężającego); b) Parametry procesu wyżarzania odpężającego badanej próbki

Po przeprowadzonej obróbce cieplnej próbka została poddana badaniom niszczącym. W skład przeprowadzonych badań niszczących wchodzi:

- próba rozciągania poprzecznego,
- próba zginania poprzecznego,

- próba udarności,
- próba twardości,
- badania makroskopowe.

Przystąpiono więc do odpowiedniego wydzielenia próbek do badań niszczących (rys. 7).



Rys. 7. Wydzielanie próbek do badań wytrzymałościowych

Próbki do próby rozciągania zostały pobrane z całości przekroju złącza, z czego próbki ze strefy C, czyli bez przetopu nie są brane pod uwagę w wynikach końcowych. Próbki do zbadania udarności złącza zostały pobrane tak, by można było naciąć klin w miejscu spoiny i w strefie wpływu ciepła. Próbki na próbę zginania zostały wydzielone z całości przekroju, wykluczając strefę bez przetopu.

W tabeli 3 zamieszczono wyniki badań wytrzymałościowych na rozciąganie. Największa siła uzyskana w czasie prowadzenia próby wynosiła $F_m = 478 \text{ kN}$, dla której wartość naprężeń granicznych na rozciąganie równa jest $R_m = 642 \text{ N/mm}^2$.

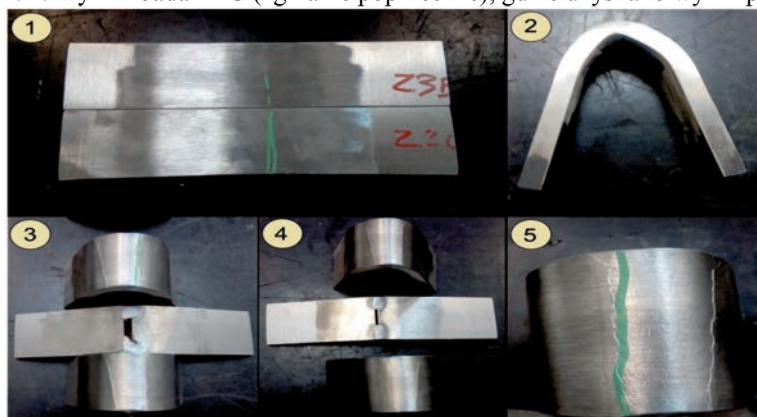
Tabela 3

Wyniki badań RM (wytrzymałość na rozciąganie)

Dane	Próba przeprowadzona zgodnie z:		[19]		
	Przyrząd:		ZD100		
	Prędkość rozciągania:		25 MPa/s		
Wyniki	Wymiary próbki		F_m	R_m	Miejsce przerwania
	axb		kN	N/mm ²	
	25,0	29,3	439	593	Spoina
	25,0	29,5	468	635	Spoina
	24,8	35,9	332	373	*

	24,9	27,9	434	625	Spoina
	25,0	28,9	436	603	Spoina
	24,8	28,8	430	602	Spoina
	25,1	28,7	450	625	Spoina
	25,2	34,3	267	309	*
	24,9	29,9	478	642	Spoina
	25,2	28,9	432	593	Spoina
	Wymagania		---	≥551	---

Rysunek 8 przedstawia próbki po próbie gięcia poprzecznego, natomiast w tabeli 4 zamieszczono wyniki badań RG (zginanie poprzeczne), gdzie uzyskano wynik pozytywny.



Rys. 8. Próbki po próbie gięcia poprzecznego. 1) Stan próbek przed rozpoczęciem badań; 2) Próbkę po gięciu; 3) Próbki po badaniu z widoczną linią gięcia na linii wtopienia prostej ścianki rowka spawalniczego; 4) Próbki po badaniu z widoczną z linią gięcia w osi spoiny; 5) Próbkę po badaniu w powiększeniu

Można zauważyć nierównomierne rozłożenie ugięcia, co jest wynikiem mniejszej twardości materiału spoiny niż materiału rodzimego.

Tabela 4

Wyniki badań RG (zginanie poprzeczne)

Dane	Próba przeprowadzona zgodnie z:		[20]		
	Zakres testu wg:		[21]		
	Temperatura otoczenia:		23±25°C		
	Przyrząd:		ZD100		
Wyniki	Wymiary próbek [mm]	Warunki gięcia	Rozstaw rolek [mm]	Rodzaj i symbol gięcia	Wynik
	10x50	d=40, α=180°	65	SBB	Pozytywny

10x50	d=40 $\alpha=180^\circ$	65	SBB	Pozytywny
10x50	d=40, $\alpha=180^\circ$	65	SBB	Pozytywny
10x50	d=40, $\alpha=180^\circ$	65	SBB	Pozytywny
10x50	d=40, $\alpha=180^\circ$	65	SBB	Pozytywny
10x50	d=40, $\alpha=180^\circ$	65	SBB	Pozytywny
10x50	d=40, $\alpha=180^\circ$	65	SBB	Pozytywny
10x50	d=40, $\alpha=180^\circ$	65	SBB	Pozytywny

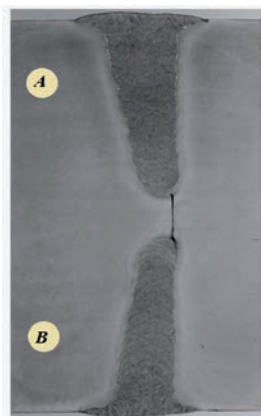
W tabeli 5 zamieszczono wyniki badań udarności. Wartość średnia dla sześciu próbek pobranych ze spoiny (VWT0/2 i VWT0/120) wynosi 207 J. Wartość średnia dla trzech próbek pobranych ze SWC (VHT1/2 i VHT1/120) wynosi 104,5 J. Minimalna praca łamania dla stali X11CrMo12-1 wynosi 27 J. Wynik badania: pozytywny.

Tabela 5

Wyniki badań udarności

Dane	Próba przeprowadzona zgodnie z:		[22]			
	Przyrząd:		ZWICK 5111			
Wyniki	Symbol	Typ: KV ₂ /J				Temp. [°C]
		1	2	3	Średnia	23°C
	VWT0/2	228	223	242	231	23°C
	VHT1/2	72	37	168	92	23°C
	VWT0/120	187	188	173	183	23°C
	VHT1/120	59	152	140	117	23°C
Wymagania					≥27	---

Wynik badań MA (makroskopowe) oraz zgląd próbki przedstawia rys. 9. Wynik badań pozytywny.



Dane	Próba przeprowadzona zgodnie z:		[23]			
	Przyrząd		STEMI 2000C			
	Powiększenie		x2:100			
	Trawienie próbki		Ma11Fe			
	Klasyfikacja wad wg:		[24]			
Wynik	ST RO NA	Nr WADY	NAZWA WADY	Symbol	Rozmiar [mm]	Notatka
	A	-	Brak wad	-	-	-
	B	-	Brak wad	-	-	-

Rys. 9. Zgląd makroskopowy próbki X11CrMo12-1 oraz wyniki badań

Wyniki pomiaru twardości (tab. 6), nie przekraczają wartości powyżej 320 HV. Różnica między najwyższą twardością spoiny a najniższą twardością materiału rodzimego nie może przekraczać 100 HV. W tym przypadku spoina ma mniejsze twardości niż materiał rodzimy. Największa różnica między dwoma ośrodkami to 34 HV.

Tabela 6

Wyniki badań HV (twardość)

Dane	Próba przeprowadzona zgodnie z:		[25,26]			
	Przyrząd:		Zwick 3212			
	Nacisk		98.1 N			
	Miejsca pomiaru twardości badanego złącza					

Wyniki	Lokalizacja	Strefa	Twardość HV10	
			Linia I	Linia II
Spoina A	Materiał rodzimy	1	211	213
			213	214
			222	219
	SWC	2	271	239
			269	254
			246,235,272	228,229,267
Spoina	3	201	213	
		199	215	
		193	221	
SWC	4	236,251,231	264,246,245	
		263	241	
		257	201	
Materiał rodzimy	5	214	222	
		216	224	
		219	224	
Spoina B	Materiał rodzimy	1	224	224
			216	227
			221	220
	SWC	2	256	220
			265	253
			263,268,267	262,270,269
	Spoina	3	200	213
			198	209
			203	210
	SWC	4	261,255,251	258,257,256
260			254	
251			202	
Materiał rodzimy	5	214	221	
		215	224	
		218	220	

4. Wnioski

Technologia wytwarzania tarcz kierowniczych turbin parowych narzuca stosowanie głębokich spoin o małym kącie ukosowania ścianek rowka spawalniczego. Do spawania tego typu złączy doskonale nadaje się metoda spawania łukiem krytym. Zaletą tej techniki jest w pełni zmechanizowany proces spawania, duża wydajność, brak szkodliwych gazów i przy opanowaniu tej techniki można spawać złącza głębokie nawet do 200 mm. Wprowadzenie metody spawania łukiem krytym znacznie usprawni pracę oraz skróci czas produkcji. Odpowiednio prowadzony proces jest bardziej efektywny niż metody spawania ręcznego oraz generuje mniej wad spawalniczych. Praca łamania w przypadku wartości średniej dla sześciu próbek pobranych ze spoiny (VWT0/2 i VWT0/120) wynosi 207 J. Wartość średnia dla trzech próbek pobranych z SWC (VHT1/2 i VHT1/120) wynosi

104,5 J. Minimalna praca łamania dla stali X11CrMo12-1 wynosi 27 J, co jest zgodne z wymaganiami. Wprowadzenie metody wiąże się również z obowiązkiem kwalifikowania technologii spawania. Jest to żmudny i długotrwały proces, ponieważ metoda spawania łukiem krytym nie jest stosowana na szeroką skalę w porównaniu z innymi metodami spawalniczymi, co wiąże się z samodzielnym opracowaniem technologii przy braku dostępnych źródeł ułatwiających opanowanie procesu i ustalenia prawidłowych parametrów. Praca ta miała na celu określenie optymalnych parametrów spawania, wpływających na podniesienie właściwości i jakości wykonanego złącza.

5. Literatura

1. Cecotka M., Wnuk M.: Zastosowanie metody spawania wąskoszczelinowego w energetyce. Przegląd Spawalnictwa 7/2014.
2. Gawroniak N.: Podstawy spawalnictwa. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. Gdańsk 2004.
3. Gundlach W. R.: Turbiny parowe przełomu wieków, praca IMP PŁ, Łódź 2003
4. Gundlach W. R.: Podstawy maszyn przepływowych i ich systemów energetycznych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne PWN 2008
5. Ojrzyński M.: Sposób wytwarzania tarczy kierowniczej turbiny parowej. Opis patentowy PL210537B1. Urząd patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Elbląg 2006.
6. Pilarczyk J. :Poradnik Inżyniera Spawalnictwo, tom II. Wydawnictwa NaukowoTechniczne. Warszawa 2005.
7. Sadowski Ł.: Zastosowanie najnowszych stali dla parametrów nadkrytycznych w blokach energetycznych. Paliwa i Energetyka 3/2015 [14].
8. Wieczorska A., Domżałski R.: THE INFLUENCE OF SUBMERGED ARC WELDING CONDITIONS ON THE PROPERTIES OF S355JR STRUCTURAL STEEL JOINTS,2021, pp. 19-29.
9. Charakterystyka spawania łukiem krytym (saw)<https://spawalnicy.pl/edukacja/57-charakterystyka-spawania-lukiem-krytym-saw> (dostęp 8.06.2022)
10. Spawanie łukiem krytym SAW. <http://www.e-spawalnik.pl/?spawanie-lukiem-krytym-saw,106> (dostęp 9.06.2022)
11. PN- EN ISO 15614 (1-13) „Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali- Badanie technologii spawania”
12. PN-EN 24063 „Spawanie, zgrzewanie i lutowanie metali -Wykaz metod i ich oznaczenia numeryczne stosowane w umownym przedstawianiu połączeń na rysunkach”
13. PN-EN 10088 „Stale odporne na korozję - Część 1: Wykaz stali odpornych na korozję”
14. PN-EN ISO 14171 „Materiały dodatkowe do spawania - Druty elektrodowe lite, druty elektrodowe proszkowe i kombinacje elektroda/topnik do spawania łukiem krytym stali niestopowych i drobnoziarnistych – Klasyfikacja”
15. PN-EN ISO 16810 „Badania nieniszczące - Badania ultradźwiękowe - Zasady ogólne”

16. PN-EN ISO 16811 „Badania nieniszczące - Badania ultradźwiękowe - Nastawianie czułości i zakresu obserwacji”
17. PN-EN ISO 5817 „Spawanie -Złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązką) -Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych”
18. PN-EN ISO 3452-1:2021-12 „Badania nieniszczące spoin - Badania penetracyjne - Poziomy akceptacji ”
19. PN-EN ISO 4136:2013-05 „Badania niszczące złączy spawanych metali -Próba rozciągania próbek poprzecznych”
20. PN-EN ISO 5173:2010/A1:2012 „Badania niszczące spoin w materiałach metalowych -Badanie na zginanie”
21. PN-EN ISO 15614-1:2017 „Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali -Badanie technologii spawania”
22. PN-EN ISO 9016:2013-5 „Badania niszczące złączy spawanych metali -Badanie udarności - Usytuowanie próbek, kierunek karbu i badanie”
23. PN-EN ISO 17639:2013-12 „Badania niszczące spawanych złączy metali -Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych”
24. PN-EN ISO 6520-1:2009 „Spawanie i procesy pokrewne - Klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach”
25. PN- EN ISO 6507-1:2007 „Metale -- Pomiar twardości sposobem Vickersa -Część 1: Metoda badania”
26. PN-EN ISO 9015-1:2011 „Badania niszczące złączy spawanych metali - Badanie twardości - Część 1: Badanie twardości złączy spawanych łukowo”