

Zastosowanie izolacji cieplnej przy wykonywaniu złączy w warunkach spawania izobarycznego

Application of thermal insulation for carrying out welded joints under isobaric welding conditions

Streszczenie

Artykuł dotyczy badań nad zastosowaniem izolacji cieplnej jako metody ograniczenia chłodzącego wpływu wody, na spawalność stali o podwyższonej wytrzymałości. Wykazano, że odizolowanie płyty spawanej w warunkach izobarycznych od wody warstwą izolatora w postaci styropianu, powoduje znaczący spadek twardości maksymalnej badanych złączy ze spoiną czołową i pachwinową. Wskazano kierunki dalszych badań, które mogą przyczynić się do poprawy spawalności stali spawanej w rozpatrywanych warunkach.

Abstract

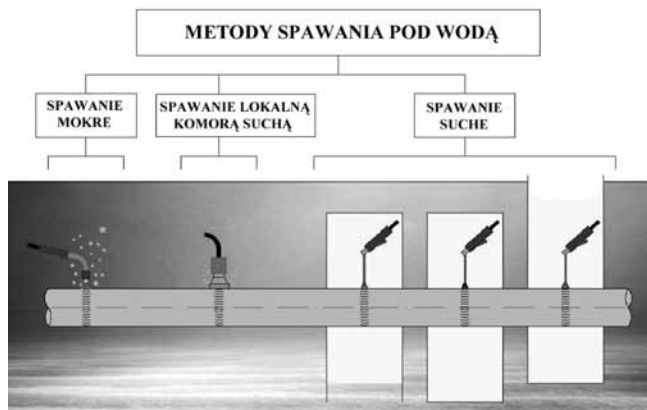
The article concerns investigations on the application of thermal insulation as a method of limitation of cooling effect of water on weldability of high strength steel. It was found that under isobaric conditions, isolation of welded plate from water by a layer of styrofoam results the significant reduction of maximum hardness of examined welded joints for both, butt and fillet welds. Directions of future researches, which can contribute to improvement of weldability of steel welded in considered conditions were indicated.

Wstęp

Spawanie izobaryczne jest jedną z metod spawania suchego pod wodą, charakteryzującą się wartością ciśnienia identyczną z ciśnieniem atmosferycznym (rys. 1). W porównaniu ze spawaniem mokrym podstawowymi zaletami tej metody jest brak szkodliwego wpływu zwiększonego ciśnienia oraz chłodzące oddziaływanie wody tylko z jednej strony spawanych elementów [1÷3]. Niemniej jednak wpływ ten jest przyczyną zwiększonej twardości złączy w porównaniu ze spawaniem w środowisku powietrznym. Tego rodzaju spawanie np. poszycia kadłuba poniżej linii wodnej statków, czy innych obiektów pływających znajdujących się w wodzie, jest jednak często nie do uniknięcia

podczas prac remontowych w przypadku braku możliwości ich zadokowania. Podstawowymi rodzajami takich prac jest wymiana skorodowanych lub uszkodzonych usztywnień dennych, jak wzdłużniki i denniki, czy elementów konstrukcji grodzi wzdłużnych lub poprzecznych. Woda znajduje się po stronie zewnętrznej, a proces spawania realizowany jest w środku jednostki. Istnieje więc ryzyko wystąpienia wyjątkowo niekorzystnych zmian właściwości strukturalno-mechanicznych w obszarze wykonywanych złączy spawanych, co może doprowadzić do awarii jednostki. Głównymi czynnikami decydującymi o zmianach strukturalnych, poza składem chemicznym stali, jest prędkość stygnięcia oraz czas stygnięcia $t_{8/5}$ [4, 5]. Zmniejszenie prędkości stygnięcia można uzyskać m.in. przez zwiększenie ilości wprowadzonego ciepła (wzrost energii liniowej spawania), jednak możliwość ta jest ograniczona wymaganiami dotyczącymi uzyskania złączy spawanych na określonym poziomie jakości, a także obawą przed przetopieniem (przepaleniem) blach poszycia, często w znacznym stopniu skorodowanych.

Dr inż. Dariusz Fydrych, dr inż. Grzegorz Rogalski – Politechnika Gdańska, mgr inż. Arkadiusz Kunowski – Gdańska Stocznia „Remontowa”, mgr inż. Dariusz Miś – Vistal Mosty.



Rys. 1. Klasyfikacja metod spawania pod wodą
Fig. 1. Classification of underwater welding methods

Inną metodą poprawy spawalności stali w środowisku wodnym jest zastosowanie izolacji cieplnej [6, 7]. Zastosowanie tego rodzaju zabiegu pozwala na korzystną zmianę warunków stygnięcia, co prowadzi do wydłużenia czasu stygnięcia $t_{8/5}$.

Wymagania dotyczące spawania poszycia kadłuba poniżej linii wodnej statków znajdujących się w wodzie zostały określone przez Morskie Towarzystwa Klasyfikacyjne zrzeszone w IACS w dokumencie *Recommendation 47. Shipbuilding and Repair Quality Standard, rev. 6*, w pkt. 5.3 cz. B [8]. Stanowią one, że spawanie takie dopuszczalne jest tylko dla stali o zwykłej i podwyższonej wytrzymałości o granicy plastyczności R_e nieprzekraczającej 355 MPa i tylko dla napraw miejscowych. W pozostałych przypadkach technologia spawania musi podlegać rozpatrzeniu i akceptacji przez Towarzystwo Klasyfikacyjne. Dodatkowo wymaga się stosowania niskowodorowych procesów spawania i materiałów spawalniczych, a także podgrzewania wstępnego przed spawaniem do temperatury minimum 5°C lub określonej w instrukcji spawania WPS w celu zmniejszenia prędkości stygnięcia oraz zapewnienia osuszenia rejonu spawania.

Cel i zakres pracy

Celem pracy była ocena skuteczności zastosowania izolacji cieplnej do zmniejszenia prędkości stygnięcia, a tym samym twardości maksymalnej SWC złączy spawanych w warunkach suchych izobarycznych. Oczekiwano, że zabieg ten doprowadzi do zmniejszenia prędkości stygnięcia i w konsekwencji

do zmiany twardości w strefie wpływu ciepła do poziomu zapewniającego zmniejszenie ryzyka wystąpienia pęknięć zimnych. Obecność niezgodności spawalniczych w złączach próbnych odnotowana podczas oceny wyników badań niszczących (makroskopowych) była w tej pracy nieistotna.

Badania własne

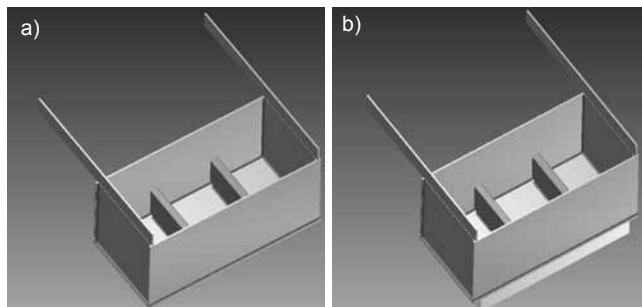
Plan badań

Po analizie czynników determinujących niepożądane właściwości złączy spawanych, wpływających m.in. na formowanie się pęknięć zimnych oraz możliwości ich zapobiegania, ustalono następujący plan badań:

- Ustalenie warunków realizacji eksperymentu.
- Zaprojektowanie i wykonanie stanowiska umożliwiającego wykonanie złączy próbnych.
- Wykonanie dwóch złączy teowych ze spoiną pachwinową oraz czołową z zastosowaniem izolacji termicznej od strony wody.
- Wykonanie dwóch złączy teowych ze spoiną pachwinową oraz czołową bez zastosowania izolacji termicznej.
- Badania wizualne (VT).
- Badania magnetyczno-proszkowe (MT).
- Badania ultradźwiękowe (UT).
- Badania metalograficzne makroskopowe.
- Pomiary twardości metodą Vickersa HV10.

Realizacja badań

Doświadczenie zostało przeprowadzone na pochylni Gdańskiej Stoczni Remontowej. Spawanie odbywało się w warunkach suchych izobarycznych



Rys. 2. Stanowisko badawcze do spawania suchego: a) bez izolacji termicznej, b) z izolacją termiczną

Fig. 2. Test stand for dry welding: a) without thermal insulation, b) with thermal insulation

Tablica I. Skład chemiczny stali o podwyższonej wytrzymałości EH36 wg atestu hutniczego

Table I. Chemical composition of EH36 steel from mill certificate

Skład chemiczny, % mas.													
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	Ti	V	N
0,16	0,38	1,43	0,018	0,005	0,07	0,005	0,02	0,037	0,03	0,027	0,004	0,004	0,006

Tablica II. Właściwości mechaniczne stali EH36 wg atestu hutniczego
Table II. Mechanical properties of EH36 steel from mill certificate

Właściwości mechaniczne		
R _e , MPa	R _m , MPa	A ₅ , %
394	537	25

Tablica III. Skład chemiczny stali A o zwykłej wytrzymałości wg wymagań IACS
Table III. Chemical composition of grade A steel from mill certificate

Skład chemiczny, % mas.				
C	Si	Mn	P	S
max. 0,21	max. 0,50	min. 2,5×C	0,035	0,035

Tablica IV. Właściwości mechaniczne stali A o zwykłej wytrzymałości gatunku wg wymagań IACS
Table IV. Mechanical properties grade A steel from mill certificate

Właściwości mechaniczne		
R _e , MPa	R _m , MPa	A ₅ , %
235	400/520	22

na otwartym powietrzu (rys. 2). W tym celu wykonano dwie skrzynie o wymiarach 500 500 1000 mm. Dno obu skrzyń wykonane zostało z blachy ze stali kadłubowej o podwyższonej wytrzymałości EH36 i grubości 15 mm. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne stali EH36 przedstawiono w tablicach I i II. Wewnątrz obu skrzyń przyspawano usztywnienia łebkowe (typu HP) ze stali kadłubowej A o zwykłej wytrzymałości, której skład chemiczny i właściwości mechaniczne, wg wymagań IACS, zestawiono w tablicach III i IV. Do dna jednej skrzyni od zewnętrznej strony przyklejono izolację termiczną (styropian o grubości 50 mm) (rys. 2b).

Przygotowane skrzynie zainstalowano na stanowisku badawczym, tzn. zanurzono je na ok. 300 mm w wodzie basenu portowego, w taki sposób, że woda nie miała możliwości przedostania się do wnętrza skrzyń. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono stanowisko badawcze.

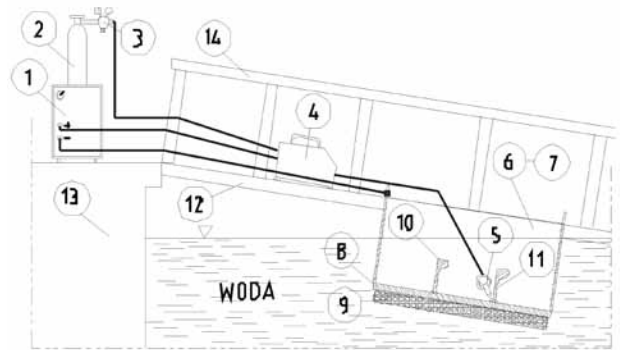
Do spawania zastosowano drut proszkowy rutyłowy ESAB OK Tubrod 15.14 (EN ISO 17632-A T 46 2 P M 2 H5) o średnicy 1,2 mm. Skład chemiczny materiału dodatkowego do spawania przedstawiono w tablicy V.

Złącza teowe ze spoinami czołowymi i pachwinowymi wykonano w pozycji nabocznej PB metodą 136 (FCAW) w osłonie mieszanki gazowej M21 wg PN-EN ISO 14175. Do wykonania złączy wykorzystano źródło prądu KEMPOMIG 4000 oraz podajnik drutu KEMPOMIG Feed 400. Złącza spawane wykonano zgodnie z procedurami obowiązującymi w przypadku spawania elementów jednostek

Tablica V. Skład chemiczny drutu ESAB OK Tubrod 15.14 (EN ISO 17632-A T 46 2 P M 2 H5)

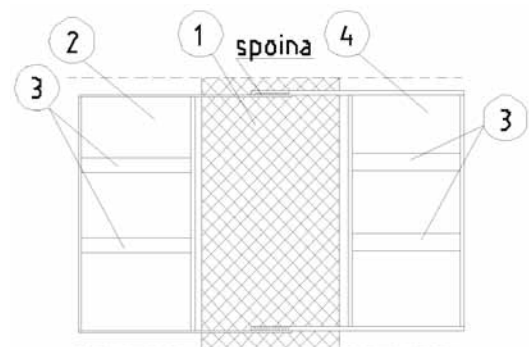
Table V. Chemical composition of ESAB OK Tubrod 15.14 (EN ISO 17632-A T 46 2 P M 2 H5) welding wire

Skład chemiczny, % mas.														
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	Ti	V	N	
0,053	0,48	1,21	0,015	0,016	0,02	0,02	0,03	-	0,02	0,01	-	0,02	-	



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego: 1 – źródło prądu KEMPOMIG 4000; 2 – butla z mieszką gazową M21; 3 – reduktor; 4 – podajnik drutu KEMPOMIG Feed 400; 5 – uchwyty spawalnicze; 6 – skrzynia z izolacją; 7 – skrzynia bez izolacji; 8 – blacha ze stali EH36; 9 – izolacja; 10 i 11 – usztywnienia łebkowe ze stali A; 12 – żelbetonowa kładka; 13 – nabrzeże; 14 – balustrada

Fig. 3. Scheme of test station: 1 – welding current source KEMPOMIG 4000; 2 – gas cylinder with gas mixture M21; 3 – gas regulator; 4 – welding wire feeder KEMPOMIG Feed 400; 5 – welding gun; 6 – box with insulation; 7 – box without insulation; 8 – steel sheet EH36; 9 – insulation; 10, 11 – steel grade A head profiles; 12 – concrete footbridge; 13 – wharf; 14 – banister



Rys. 4. Widok z góry na skrzynie zamontowane na stanowisku badawczym: 1 – żelbetonowa kładka; 2 – skrzynia z podklejoną do dna izolacją; 3 – usztywnienia łebkowe; 4 – skrzynia bez izolacji

Fig. 4. Top view of test station: 1 – concrete footbridge; 2 – box with insulation; 3 – head profiles; 4 – box without insulation

plywających. Temperatura powietrza podczas spawania wynosiła 10°C, natomiast wody 4,5°C. Do cięcia i ukosowania brzegów usztywnień łebkowych na ½V wykorzystano palnik acetylenowo-tlenowy. Miejsca, w których ułożono spoiny, oczyszczono z tlenków i innych zanieczyszczeń.

W przypadku złączy ze spoinami czołowymi po wykonaniu ściegów wypełniających oraz licowych usunięto grań spoiny metodą żłobienia elektropowietrznego, a następnie wykonano podspawanie. W tablicy VI przedstawiono parametry wykonania złączy próbnych.

Tablica VI. Parametry technologiczne spawania złączy teowych ze spoinami czołowymi (BW) i pachwinowymi (FW)
Table VI. Welding parameters of T-joints with butt and fillet welds

Nr i rodzaj złącza	Nr ściegu	Średnica drutu d mm	Temp. podgrzewania wstępnego T °C	Natężenie przepływu gazu Wg l/min	Średnie natężenie prądu spawania I A	Średnie napięcie łuku U V	Ilość wprowadzonego ciepła EI* kJ/cm
Z izolacją	1BW	1	40÷50	20	220	29,4	6,81
		2	110÷140	20	220	29,4	4,56
		3	120÷150	20	220	29,4	3,86
	Po usunięciu grani spoiny						
	2FW	4	40÷50	20	220	29,4	7,59
		5	30÷40	20	220	29,4	4,71
6		40÷50	20	220	29,4	6,04	
Bez izolacji	3FW	1	45÷55	20	220	29,4	8,85
		2	150÷160	20	220	29,4	7,24
	4BW	1	30÷40	20	220	29,4	8,71
		2	40÷50	20	220	29,4	8,90
		3	40÷60	20	220	29,4	5,70
		4	40÷60	20	220	29,4	4,71
		5	50÷70	20	220	29,4	4,64
		Po usunięciu grani spoiny					
	6	40÷50	20	220	29,4	7,45	
		5	35÷40	20	220	29,4	4,92
	6	30÷40	20	220	29,4	6,04	

EI* – obliczono zgodnie z wytycznymi zawartymi w PN-EN 1011-1

Wyniki badań

Badania nieniszczące

Zakres badań nieniszczących NDT obejmował 100% złączy próbnych i zakładał przeprowadzenie badań wizualnych (VT) oraz magnetyczno-proszkowych (MT).

Badania wizualne wykonano zgodnie z wytycznymi normy PN-EN ISO 17637, natomiast magnetyczno-proszkowe zgodnie z PN-EN ISO 17638. Na podstawie badań stwierdzono występowanie podtopień oraz nierównomierności lica spoiny. Ustalono, że złącza spawane dla niezgodności zewnętrznych spełniają wymagania określone dla poziomu jakości C wg PN-EN ISO 5817. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wybrane złącza próbne po wykonanych badaniach NDT.



Rys. 5. Złącze próbne 1BW. Widoczne podtopienie i nierówne lico spoiny

Fig. 5. Test joint 1BW. Apparent undercut and irregularity of weld surface



Rys. 6. Złącze próbne 3FW. Widoczne nierówne lico spoiny

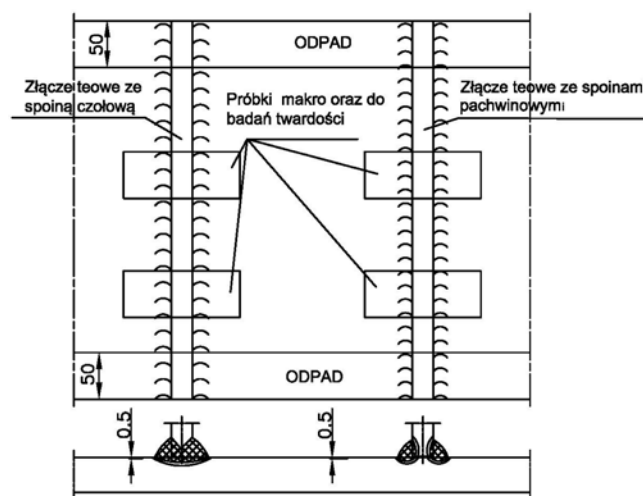
Fig. 6. Test joint 3FW. Apparent irregularity of weld surface

Badania niszczące

Badania niszczące wykonano w celu określenia geometrii spoin złączy próbnych, identyfikacji ewentualnych niezgodności spawalniczych oraz wyznaczenia rozkładów twardości w poszczególnych obszarach. Zakres badań obejmował:

- badania makroskopowe,
- pomiar twardości metodą Vickersa.

Na rysunku 7 przedstawiono sposób pobierania próbek do badań niszczących.

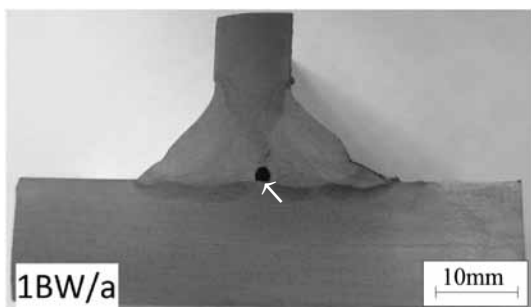


Rys. 7. Schemat pobierania próbek do badań niszczących

Fig. 7. Scheme of sampling of tested joints for destructive testing

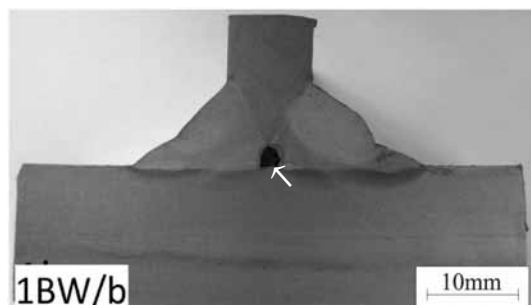
Badania makroskopowe

Badania makroskopowe przeprowadzono zgodnie z wymaganiami PN-EN 1321. Z każdego złącza próbnego pobrano dwie próbki do wykonania zglądów metalograficznych makroskopowych. Próbki do badań



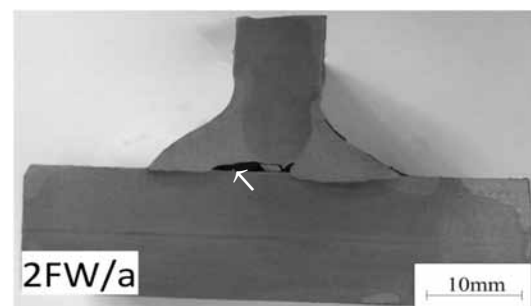
Rys. 8. Próbką 1BW/a, spawanie z izolacją. Złącze teowe ze spoiną czołową. Widoczny brak przetopu

Fig. 8. Sample 1BW/a, welded with insulation. T-joint with butt weld. Apparent lack of fusion



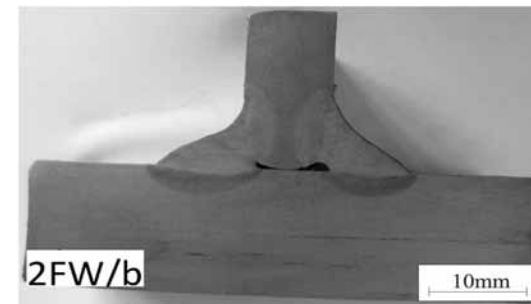
Rys. 9. Próbką 1BW/b, spawanie z izolacją. Złącze teowe ze spoiną czołową. Widoczny brak przetopu

Fig. 9. Sample 1BW/b, welded with insulation. T-joint with butt weld. Apparent lack of fusion



Rys. 10. Próbką 2FW/a, spawanie z izolacją. Złącze teowe ze spoinami pachwinowymi. Widoczny brak przetopu w spoinie pachwinowej (nieprzetopienie krawędzi)

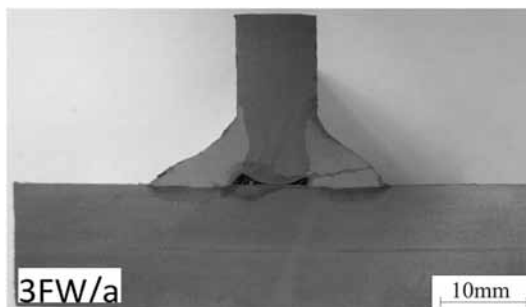
Fig. 10. Sample 2FW/a, welded with insulation. T-joint with fillet welds. Apparent lack of fusion



Rys. 11. Próbką 2FW/b, spawanie z izolacją. Złącze teowe ze spoinami pachwinowymi. Nie stwierdzono niezgodności

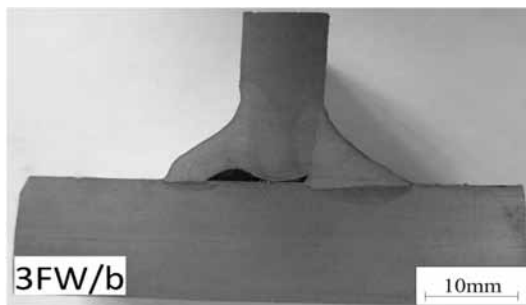
Fig. 11. Sample 2FW/b, welded with insulation. T-joint with fillet welds. Defects not found

poddano szlifowaniu i polerowaniu, a następnie trawieniu 5% nitaliem. Umożliwiło to określenie w złączach spawanych charakterystycznych obszarów, tj. strefy wpływu ciepła (SWC), materiału spoiny (MS) oraz geometrii uzyskanych spoin i niezgodności spawalniczych. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 8÷15.



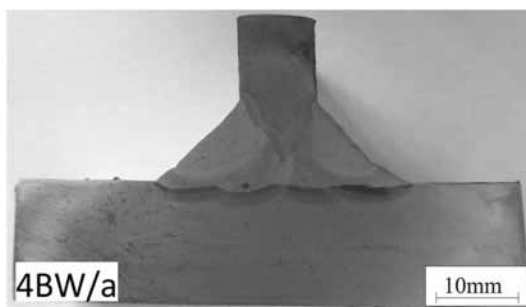
Rys. 12. Próbką 3FW/a, spawanie bez izolacji. Złącze teowe ze spoinami pachwinowymi. Nie stwierdzono niezgodności

Fig. 12. Sample 3FW/a, welded without insulation. T joint with fillet welds. Defects not found



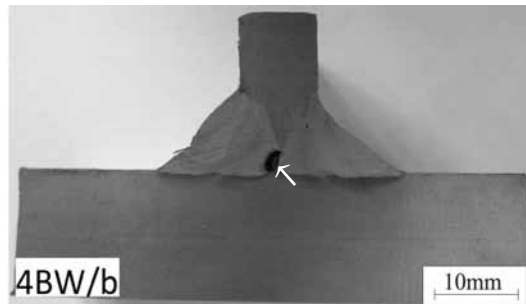
Rys. 13. Próbką 3FW/b, spawanie bez izolacji. Złącze teowe ze spoinami pachwinowymi. Widoczny brak przetopu w spoinie pachwinowej (nieprzetopienie krawędzi)

Fig. 13. Sample 3FW/b, welded without insulation. T-joint with fillet joints. Apparent lack of fusion



Rys. 14. Próbką 4BW/a, spawanie bez izolacji. Złącze teowe ze spoiną czołową. Nie stwierdzono niezgodności

Fig. 14. Sample 4BW/a, welded without insulation. T-joint with butt weld. Defects not found

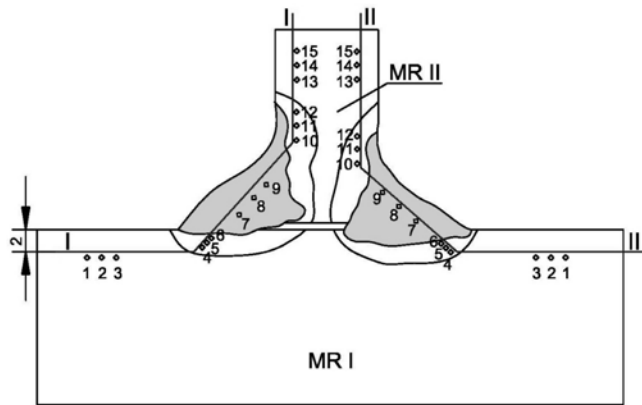


Rys. 15. Próbką 4BW/b, spawanie bez izolacji. Złącze teowe ze spoiną czołową. Widoczny brak przetopu

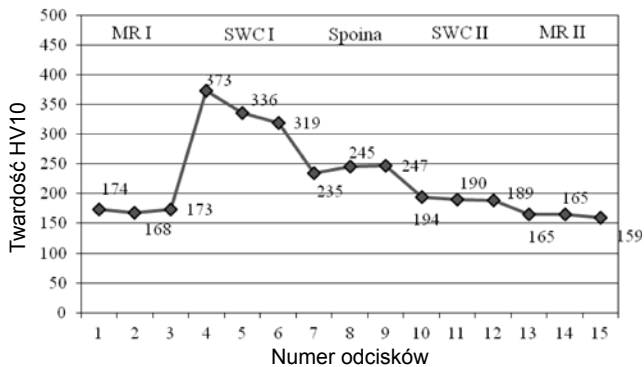
Fig. 15. Sample 4BW/b, welded without insulation. T-joint with butt weld. Apparent lack of fusion

Pomiar twardości metodą Vickersa

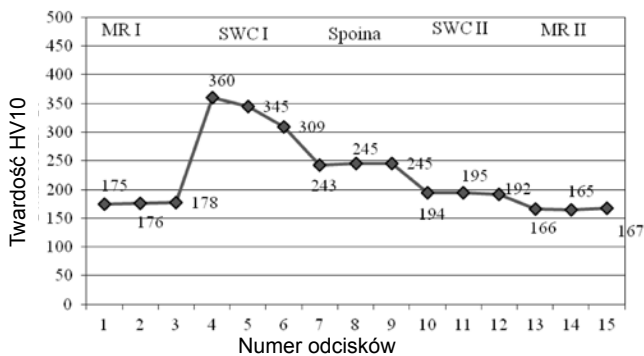
Pomiary twardości zostały wykonane zgodnie z zasadami zawartymi w normie PN-EN 1043-1:2000. Badania te pozwoliły na wyznaczenie i porównanie rozkładów twardości wykonanych złączy próbnych. Badanie twardości wykonano dla czterech próbek, po jednej dla każdego złącza. Na każdej próbce zostały naniesione dwie linie pomiarowe I oraz II, wzdłuż których wykonano odciski. Każdą z linii pomiarowych usytuowano w odległości 2 mm od powierzchni badanej próbki. Na rysunku 16 przedstawiono schemat złącza z zaznaczeniem linii pomiarowych oraz rozmieszczeniem



Rys. 16. Schemat pomiaru twardości złącza próbnego
Fig. 16. Scheme of measurement of test joint's hardness



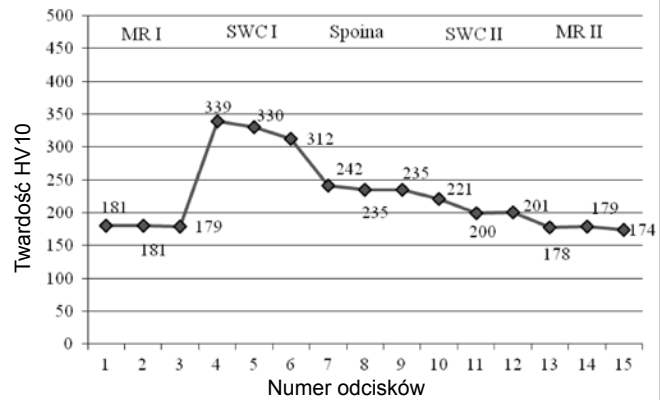
Rys. 17. Rozkład twardości. Próbką 1BW/a, spawana z izolacją, linia pomiarowa I, HV10_{max} = 373
Fig. 17. Hardness distribution across 1BW/a sample, welded with insulation, measurement line I, HV10_{max} = 373



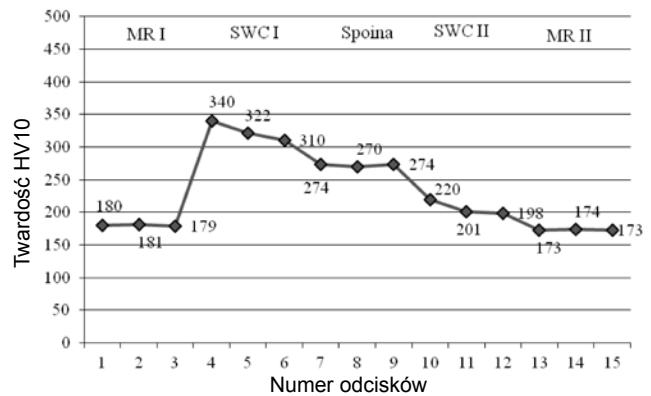
Rys. 18. Rozkład twardości. Próbką 1BW/a, spawana z izolacją, linia pomiarowa II, HV10_{max} = 360
Fig. 18. Hardness distribution across 1BW/a sample, welded with insulation, measurement line II, HV10_{max} = 360

odcisków wgłębnika. Do badań wykorzystano twardościomierz Vickersa VEB. W przypadku stali EH36 ustalono kryterium akceptacji na poziomie 350 HV10 (zgodnie z wymaganiami kwalifikowania technologii spawania wg IACS). Wyniki pomiarów twardości przedstawiono na rysunkach 17÷24.

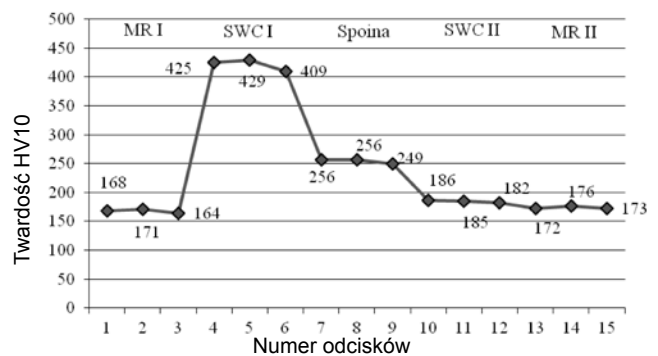
Na podstawie przedstawionych rozkładów twardości dla poszczególnych złączy próbnych można wnioskować, że próbki spawane bez izolacji termicznej (3FW/a, 4BW/a) charakteryzują się większą



Rys. 19. Rozkład twardości. Próbką 2FW/a, spawana z izolacją, linia pomiarowa I, HV10_{max} = 339
Fig. 19. Hardness distribution across 2FW/a sample, welded with insulation, measurement line I, HV10_{max} = 339



Rys. 20. Rozkład twardości. Próbką 2FW/a, spawana z izolacją, linia pomiarowa II, HV10_{max} = 340
Fig. 20. Hardness distribution across 2FW/a sample, welded with insulation, measurement line II, HV10_{max} = 340



Rys. 21. Rozkład twardości. Próbką 3FW/a, spawana bez izolacji, linia pomiarowa I, HV10_{max} = 429
Fig. 21. Hardness distribution across 3FW/a sample, welded without insulation, measurement line I, HV10_{max} = 429

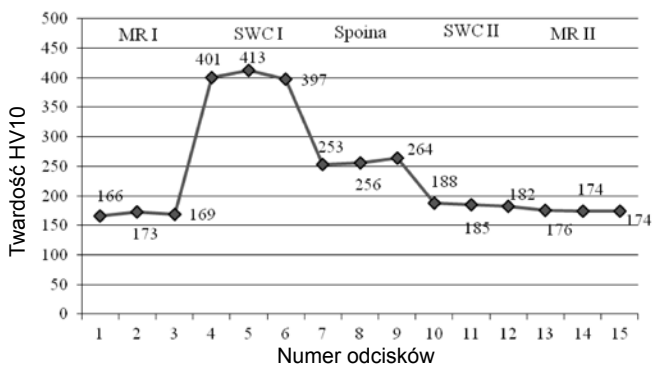
twierdzością maksymalną strefy wpływu ciepła w porównaniu z próbkami spawanymi z izolacją termiczną. Największą twardość stwierdzono w próbce 3FW/a spawanej bez izolacji termicznej – wynosiła ona 429 HV 10. Uzyskana wartość świadczy o formowaniu się w tym obszarze struktur hartowniczych, w tym przypadku prawdopodobnie martenzytu. Tego rodzaju struktura oraz zwiększona zawartość wodoru dyfundującego i naprężenia spawalnicze sprzyjają formowaniu się pęknięć zimnych [9].

Podsumowanie

Uzyskane wyniki badań potwierdziły początkowe przypuszczenia, że zastosowanie izolacji termicznej pozwoli na zmniejszenie prędkości stygnięcia złączy spawanych, co korzystnie wpłynie na wartości twardości maksymalnej w obszarze SWC. Badania wykazały, że nastąpił spadek twardości maksymalnej w SWC o 50÷60 HV10, co świadczy o pozytywnym wpływie zastosowanej warstwy izolującej na prędkość stygnięcia. Na rysunku 25 przedstawiono zestawienie zmierzonych wartości twardości maksymalnej dla poszczególnych złączy i linii pomiarowych.

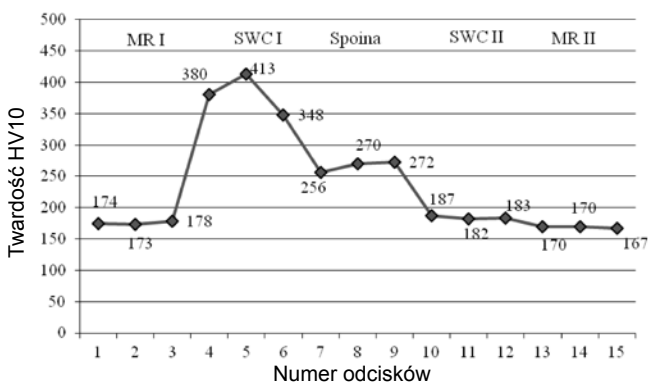
W odniesieniu do wyników pomiarów twardości należy zaznaczyć, że wskutek zastosowania izolacji termicznej nastąpił spadek jej wartości poniżej 350 HV10 dla próbki 2FW/a, odpowiednio 339 HV10 na linii pomiarowej I oraz 340 HV10 na linii pomiarowej II. Jednocześnie można stwierdzić, że wszystkie złącza wykonane przy zastosowaniu izolacji cieplnej spełniają wytyczne PN-EN ISO 15614-1 dla złączy spawanych bez obróbki cieplnej z grup materiałowych 1 oraz 2 wg CR ISO 15608 (380 HV10), jednak częściowo nie spełniają wymagań przepisów IACS (350 HV10).

W celu uzyskania mniejszych wartości twardości można zastosować następujące zabiegi technologiczne: zwiększenie ilości wprowadzonego ciepła, zastosowanie spawania wielościegowego oraz zwiększenie grubości izolacji termicznej. Możliwe jest również zastosowanie materiału o mniejszym współczynniku przewodzenia ciepła, choć zjawiska termodynamiczne zachodzące na styku dwóch różnych stanów skupienia (ciało stałe/ciecz) są bardzo złożone i zastosowanie tego rodzaju materiału może nie dać zadowalających wyników. Wszystkie omówione metody powinny zostać zweryfikowane eksperymentalnie, co pozwoli na określenie ich skuteczności.



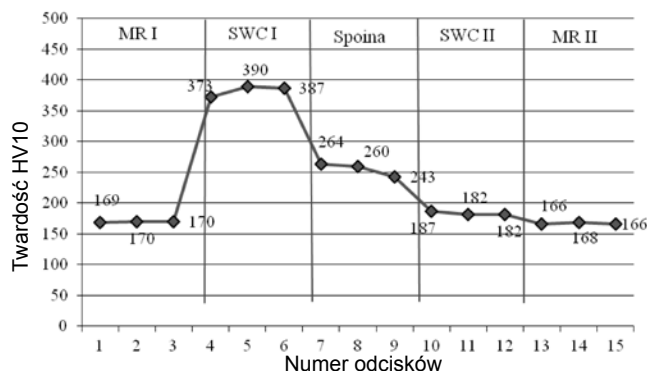
Rys. 22. Rozkład twardości. Próbką 3FW/a, spawana bez izolacji, linia pomiarowa II, $HV10_{max} = 413$

Fig. 22. Hardness distribution across 3FW/a sample, welded without insulation, measurement line II, $HV10_{max} = 413$



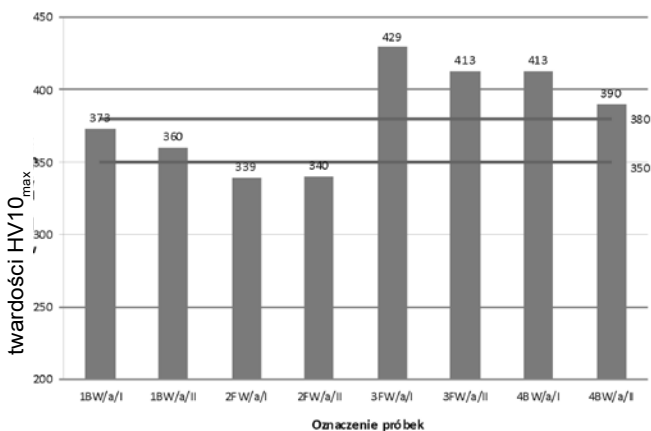
Rys. 23. Rozkład twardości. Próbką 4BW/a, spawana bez izolacji, linia pomiarowa I, $HV10_{max} = 413$

Fig. 23. Hardness distribution across 4BW/a sample, welded without insulation, measurement line I, $HV10_{max} = 413$



Rys. 24. Rozkład twardości. Próbką 4BW/a, spawana bez izolacji, linia pomiarowa II, $HV10_{max} = 390$

Fig. 24. Hardness distribution across 4BW/a sample, welded without insulation, measurement line II, $HV10_{max} = 390$



Rys. 25. Maksymalne twardości $HV10_{max}$ w SWC złączy próbników

Fig. 25. Maximum hardness values $HV10_{max}$ of HAZ of tested joints

Wnioski

Na podstawie analizy wyników badań sformułowano następujące wnioski:

- Potwierdzono skuteczność zastosowania izolacji termicznej jako metody poprawy spawalności stali wyrażonej twardością złączy w warunkach spawania suchego izobarycznego.
- Badania nieniszczące nie wykazały znaczących niezgodności w żadnym ze złączy, ale badania metalograficzne makroskopowe wykazały braki przetopu zarówno dla próbek spawanych z izolacją, jak i bez niej.
- Zakres pomierzonych twardości dla stali o podwyższonej wytrzymałości wynosi od 339 HV10 (złącze 2FW) do 429 HV10 (złącze 3FW). W większości próbek spawanych stwierdzono przekroczenie dopuszczalnej w przepisach IACS (350 HV10) twardości w SWC wynoszącej 350 HV10 z wyjątkiem próbki 2FW. Wszystkie złącza wykonane z izolacją cieplną spełniają wymagania PN-EN ISO15614-1, chociaż częściowo nie spełniają wymagań przepisów.
- Badania można kontynuować w następujących kierunkach:
 - zwiększenia ilości wprowadzonego ciepła,
 - zastosowania spawania wielościegowego (np. techniki ściegu odpuszczającego),
 - zwiększenia grubości izolacji,
 - Zastosowania materiału izolacji o mniejszym współczynniku przewodzenia ciepła.

Literatura

- [1] Cotton H.C.: Welding underwater and in the splash zone – a review. Proceedings of the International Conference „Underwater Welding”, Trondheim, Norway 1983.
- [2] Christensen N.: The metallurgy of underwater welding. Proceedings of the International Conference „Underwater Welding”, Trondheim, Norway 1983.
- [3] Łabanowski J., Fydrych D., Rogalski G.: Underwater Welding – a review. Advances in Materials Science 3/2008.
- [4] Łomozik M.: Metaloznawstwo i badania metalograficzne połączeń spawanych. Instytut Spawalnictwa. Gliwice 2005.
- [5] Tasak E.: Spawalność stali. Wyd. Fotobit. Kraków 2002.
- [6] Keenan P. J.: Thermal insulation of wet shielded metal arc welds. Massachusetts Institute of Technology 1993.
- [7] Chigariev V.V., Ustinov A.V.: Design-experimental estimation of the possibility of reduction of the HAZ metal cooling rate in wet underwater welding. The Paton Welding Journal 5/2000.
- [8] Recommendation 47. Shipbuilding and Repair Quality Standard, rev. 6. IACS May 2012.
- [9] Fydrych D.: Pękanie zimne stali spawanej w środowisku wodnym. Przegląd Spawalnictwa 10/2012.

W następnym numerze

Tomasz Babul, Sylwester Jończyk

Pewne aspekty badania kół zębatych metodą prądów wirowych.

Leszek Piotrowski, Bolesław Augustyniak, Marek Chmielewski

Stan zaawansowania metody diagnozowania materiałów z wykorzystaniem efektu emisji magnetoakustycznej.

Paweł Grzywna, Dominik Kukła, Lech Dietrich

Wykorzystanie optycznych metod do lokalizacji uszkodzeń zmęczeniowych.

Marcin Lewandowski

Nowa architektura i możliwości przetwarzania sygnałów w systemach defektoskopowych.

Maciej Roskosz

Kryteria oceny w metodzie magnetycznej pamięci metalu.

Maciej Roskosz, Krzysztof Fryczkowski

Porównanie szumu Barkhausena i własnego magnetycznego pola rozproszenia w odkształconych plastycznie próbkach ze stali S235 i P265GH.

Bolesław Augustyniak

Magnetyczne metody diagnozowania stali napromieniowanych neutronami.