

Napawanie elementów wymiennika ciepła austenitycznym drutem proszkowym

Surfacing of heat exchanger elements using the austenitic flux-cored wire

Streszczenie

Na potrzeby przemysłu energetycznego produkuje się wymienniki ciepła przeznaczone do eksploatacji w warunkach agresywnych chemicznie, np. w środowisku siarkowodoru. Z przyczyn ekonomicznych często stosuje się w takim przypadku materiały bimetaliczne wytwarzane procesami napawania. W artykule przedstawiono wyniki badań nieniszczących, pomiarów twardości, analizy składu chemicznego, pomiarów ferrytu delta oraz badań makro- i mikroskopowych próbek ze stali S355J2C+N napawanych drutem proszkowym o strukturze austenitycznej. Stwierdzono, że zastosowanie tego procesu umożliwia wykonanie warstw napawanych charakteryzujących się właściwościami spełniającymi założone kryteria.

Słowa kluczowe: napawanie; drut proszkowy; ferryt; wymiennik ciepła; siarkowódór

Abstract

Heat exchangers designed for use in chemically aggressive environments, for example in a hydrogen sulfide, are produced for the energy industry. For this purpose, surfacing of materials is often used, mostly because it is an economical process. This article presents the results of non-destructive testing, hardness measurements, chemical composition analysis, delta ferrite measurements and macro- and microscopic observations of specimens of S355J2C+N steel surfaced with austenitic flux-cored wire. It was found, that application of this process allows to perform surfaced layers characterized by properties that meet the established criteria.

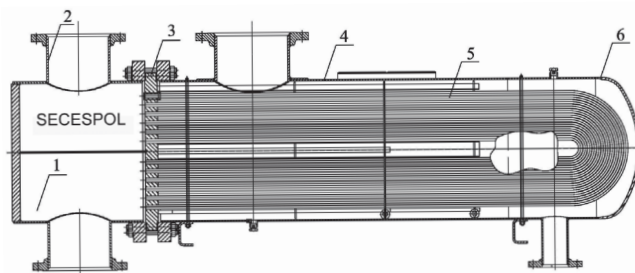
Keywords: surfacing; flux-cored wire; ferrite; heat exchanger; hydrogen sulfide

Wstęp

Modyfikowanie powierzchni materiałów metalowych to jeden z kierunków rozwoju technologii spawalniczych [1,2]. Związane jest to z możliwością zaimplementowania procesów spawalniczych do nanoszenia warstw wierzchnich poprzez napawanie, natryskiwanie cieplne czy zgrzewanie (np. wybuchowe lub tarciove) [3÷6]. Technologie te są najczęściej stosowane do wytwarzania gotowych wyrobów (np. elementy wchodzące w skład wszczepianych implantów), półwyrobów (blachy, rury, kołnierze płaskie i szyjkowe itp.) oraz napraw i regeneracji. Badania nad możliwością wykorzystania technik spawalniczych do napraw i regeneracji były prowadzone w szerokim zakresie. Dotyczyły m.in. regeneracji zaworów silników okrętowych metodą napawania plazmowego i laserowego [7,8] i naprawy wyeksploatowanych detali [9]. Inne kierunki badań związane są z określeniem zmiennych istotnych wpływających na przebieg procesu nanoszenia warstw, optymalizację parametrów technologicznych oraz uzyskanie optymalnych właściwości metalurgiczno-eksploatacyjnych [10÷16].

Półfabrykaty wytworzone na drodze napawania, natryskiwania cieplnego bądź zgrzewania są szeroko stosowane m.in. w przemyśle energetycznym. Typowymi urządzeniami, które są wytwarzane dla tej branży, są wymienniki

ciepła [17,18]. Urządzenia te pracują często z agresywnymi chemicznie mediami roboczymi. Z tego względu muszą być budowane z odpowiednich materiałów, np. stali wysokostopowych, stopu Monel (UNS 04400) czy stopów tytanu [17,19÷21]. Na rysunku 1 przedstawiono wymiennik ciepła wytworzony przez firmę SECESPOL Sp. z o.o. z węzownicą



Rys. 1. Przykład płaszczowego wymiennika ciepła z U-rurową węzownicą produkowanego przez firmę SECESPOL Sp. z o.o.: 1 – głowica płaska, 2 – króciec, 3 – płyta sitowa, 4 – płaszcz zbiornika, 5 – węzownica U-rurowa, 6 – dennica kulista [22]

Fig. 1. Shell and tube heat exchanger with U-tube coil produced by SECESPOL: 1 – flat head; 2 – nozzle, 3 – tube-plate, 4 – shell, 5 – U-tube coil, 6 – ellipsoidal head

Dr inż. Grzegorz Rogalski; dr inż. Dariusz Fydrych; mgr inż. Karolina Prokop-Strzelczyńska – Politechnika Gdańska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: grzrogal@pg.gda.pl

U-rurową, w którym płytę sitową (3), kołnierze oraz rury króćców (2) wykonano z zastosowaniem procesu napawania (stałe typu P256GH napawano stopiwem austenitycznym).

Stosowanie ścian sitowych ze stali kotłowych np. P355GH napawanych stopiwem austenitycznym lub platerowanych stalą austenityczną jest podyktowane najczęściej względami ekonomicznymi. Połączenia rur austenitycznych ze ścianą sitową w takiej konfiguracji materiałowej wymagają ze względu na parametry pracy i czynnik roboczy szczególnej uwagi. Wykonanie takich połączeń powinno być oparte na kwalifikowanej technologii spawania [18]. Uzyskanie złączy bez niezgodności spawalniczych wymaga również stosowania rur spełniających wymagania odpowiednich norm przedmiotowych np. PN-EN 10217-7 (Rury stalowe ze szwem do zastosowań ciśnieniowych. Warunki techniczne dostawy. Część 7: Rury ze stali odporne na korozję) oraz znajomości mechanizmów wpływających na ich właściwości np. wpływu przesycania [19,20]. Należy również zaznaczyć, że na poziom jakości połączenia wpływa jakość procesu napawania ściany sitowej, a to z kolei wymaga szczegółowej analizy procesu.

Badania własne

Celem badań była ocena możliwości zastosowania procesu napawania drutem proszkowym do uzyskania warstw wierzchnich o strukturze austenitycznej na podłożu ze stali S355J2C+N spełniających założone kryteria akceptacji.

Poza wymaganiami normy PN-EN ISO 15614-7 (Specyfikacja i kwalifikowanie technologii spawania metali. Badanie technologii spawania. Część 7: Napawanie) wykonana war-

stwa musiała spełniać zawężone kryteria akceptacji dla zawartości ferrytu delta wyrażonego liczbą ferrytową FN oraz dla składu chemicznego napoiny. Te dodatkowe ograniczenia wynikały ze środowiska pracy dla urządzeń utrzymujących ciśnienie mokrych linii H₂S tzw. „serwisu kwaśnego”.

Plan badań

Założony plan badań uwzględnił wymagania PN-EN ISO 15614-7 (pkt. 7.1, tab. I) dla napawania i składał się z następujących etapów:

1. Opracowanie technologii napawania.
2. Wykonanie złączy próbnych zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 15614-7.
3. Przeprowadzenie badań nieniszczących: badania wizualne (VT), badania penetracyjne (PT), badania ultradźwiękowe (UT), pomiary zawartości ferrytu delta.
4. Przeprowadzenie badań niszczących: próba zginania bocznego, pomiary twardości HV10, badanie metalograficzne makroskopowe i mikroskopowe, analiza składu chemicznego warstwy napawanej.

Wytyczne procesu napawania

Napawanie wykonano przy zastosowaniu drutów proszkowych (proces 136). Podyktowane było to koniecznością zapewnienia wysokiej wydajności [23] oraz możliwością zaaplikowania kwalifikowanego WPQR do łączenia elementów wykonanych z elementów platerowanych i napawanych. Wykonanie prób technologicznych pozwoliło

Tablica I. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne stali S355J2C+N wg świadectwa odbioru

Table I. Chemical composition and mechanical properties of S355J2C+N steel acc. to inspection certificate

| Skład chemiczny, % | | | | | | | | | | |
|-------------------------|------|-----------------------|-------|--------------------|------|-----------------|------|-------|----------------------|------|
| C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo | Fe, V, Ti, Al, N, Mb | CEV |
| 0,164 | 1,38 | 0,38 | 0,019 | 0,005 | 0,03 | 0,03 | 0,08 | 0,005 | reszta | 0,42 |
| Właściwości mechaniczne | | | | | | | | | | |
| R _m , MPa | | R _{eH} , MPa | | A ₅ , % | | KV, J | | | | |
| 528 | | 393 | | 33,1 | | -20 °C: 217÷240 | | | | |

Tablica II. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne stopiów zastosowanych w badaniach wg świadectwa odbioru

Table II. Chemical composition and mechanical properties of filler materials in weld deposited acc. to inspection certificate

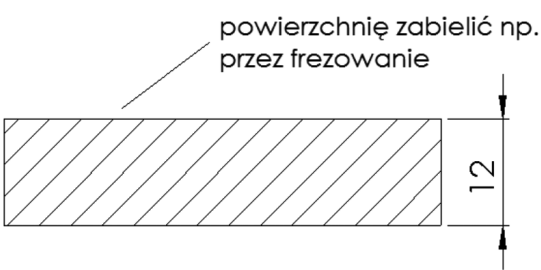
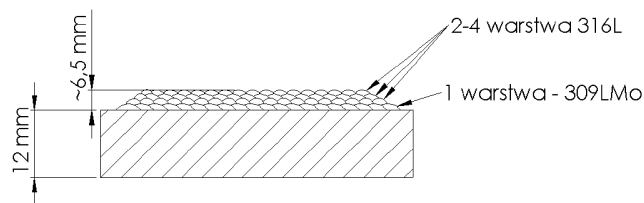
| Skład chemiczny stopiwa 309LMo, % | | | | | | | | | |
|--|-------|-------------------------|-------|--------------------|-------|------------|-------|-------|--------|
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Cu | Fu |
| 0,035 | 0,785 | 1,48 | 0,031 | 0,012 | 23,12 | 2,8 | 12,83 | 0,247 | reszta |
| Typowe właściwości mechaniczne spoiwa typu 309LMo | | | | | | | | | |
| R _m , MPa | | R _{p0,2} , MPa | | A ₅ , % | | KV, J | | | |
| 760 | | 590 | | 32 | | +20 °C: 50 | | | |
| Skład chemiczny stopiwa typu 316L, % | | | | | | | | | |
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | Cu | Fu |
| 0,021 | 0,633 | 1,72 | 0,028 | 0,013 | 18,88 | 2,52 | 12,29 | 0,074 | reszta |
| Typowe właściwości mechaniczne stopiwa typu 309LMo | | | | | | | | | |
| R _m , MPa | | R _{p0,2} , MPa | | A ₅ , % | | KV, J | | | |
| 600 | | 490 | | 32 | | -60 °C: 40 | | | |
| 24FN – 309LMo; 10FN – 316L | | | | | | | | | |

na ustalenie wartości zmiennych istotnych umożliwiającą nanoszenie warstw wierzchnich charakteryzujących się poprawnym wtopieniem, brakiem niezgodności spawalniczych oraz spełnieniem kryteriów akceptacji dla liczby ferrytowej FN oraz składu chemicznego napoiny. Jako materiał podstawowy użyto blachy ze stali S355J2C+N o grubości 12,0 mm, tablica I. Do wykonania pierwszej warstwy buforowej zastosowano stopiwo typu 309LMo (oznaczenie wg EN ISO 17633-A: T 23 12 2 L R M21/C1), natomiast dla warstw docelowych stopiwo typu 316L (wg EN ISO 17633-A: T 19 12 3 L R M21/C1 3). Skład chemiczny oraz właściwości wytrzymałościowe stopiw zgodnie ze świadectwem odbioru 3.1 przedstawiono w tablicy II.

Wymiary złącza próbnego (250 x 400 mm) oraz obszar wykonania warstwy napawanej (150 x 200 mm) były zgodne z PN-EN ISO 15614-7 (pkt. 6, rys. 1). Ze względu na wymagania dla docelowej grubości napoiny ($t = 4,5$ mm) wykonano, łącznie z nadatkiem technologicznym na obróbkę wiórowo-ścierną, warstwę napawaną o grubości 6,5 mm. Schemat wykonania procesu wraz z zakresem parametrów prądowych przedstawiono w tablicy III.

Próbki do badań pobierano zgodnie z rysunkiem 3 normy PN-EN ISO 15614-7 przedstawiającym usytuowanie próbek do napawania na płycie. Kryteria akceptacji dla badań niszczących oraz niszczących ustalono na podstawie pkt. 7.5 (Kryteria odbioru) wspomnianej normy przedmiotowej. Dodatkowo dla liczby ferrytowej kryterium akceptacji ustalono na podstawie specyfikacji technicznej zleceniodawcy, FN musiało mieścić się w zakresie 4÷10 FN. Skład chemiczny badanej powierzchni musiał odpowiadać składowi chemicznemu spoiwa typu 316L (T 19 12 3 L R M21/C1 3) wg PN-EN ISO 17633.

Tablica III. Zmienne istotne dla procesu napawania
Table III. Essential variables for surfacing process

| Kształt połączenia | Kolejność spawania |
|---|--|
|  <p>powierzchnię zabielić np. przez frezowanie</p> <p>12</p> |  <p>2-4 warstwa 316L</p> <p>1 warstwa - 309LMo</p> <p>~6,5 mm</p> <p>12 mm</p> |
| <p>Rodzaj prądu / biegunowość: DC (+)</p> <p>1 warstwa: I=140-145 A; U=28÷29 V; Vsp=5,0÷6,5 mm/s</p> <p>2÷4 warstwa: I=145÷150 A; U=28 ÷29 V; Vsp=4,5÷6,5 mm/s</p> <p>Gaz osłonowy: PN-EN ISO 14175: M21 (82% Ar + 18% CO₂)</p> <p>Pozycja napawania: PA</p> | |

Tablica IV. Wyniki badań z próby zginania bocznego
Table IV. Results from side bend test

| Nr próbki | Oznaczenie próbki | Rodzaj próbki | Wymiar próbki szerokość x grubość [mm] | Wynik badania |
|-----------|-------------------|---------------|--|---------------|
| 1 | N-01 | SBB | 10 x 18,5 | Pozytywny |
| 2 | N-02 | SBB | 10 x 18,5 | Pozytywny |

Wyniki badań nieniszczących i ich analiza

Badania wizualne wykonano zgodnie z PN-EN ISO 17637 (Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania wizualne złączy spawanych), badania penetracyjne zgodnie z PN-EN ISO 3452-1 (Badania nieniszczące. Badania penetracyjne. Część 1: Zasady ogólne), a badania ultradźwiękowe według wytycznych PN-EN ISO 17640 (Badania nieniszczące spoin. Badania ultradźwiękowe. Techniki, poziomy badania i ocean). Żadne z badań nie wykazało występowania niezgodności spawalniczych, które są charakterystyczne dla procesu napawania i metody 136, czyli pęknięć powierzchniowych, pęknięć w obszarze wtopienia, pęcherzy gazowych, porów, żużli oraz przyklejeń. Świadczy to o poprawnie wykonanych operacjach czyszczenia międzyścięgowego, dobrej technice napawania i właściwym doborze parametrów napawania. Wykonana płyta próbna spełniła wszystkie kryteria akceptacji stawiane przez normę PN-EN 15614-7 (pkt 7.5).

Wyniki badań niszczących i ich analiza Próba zginania

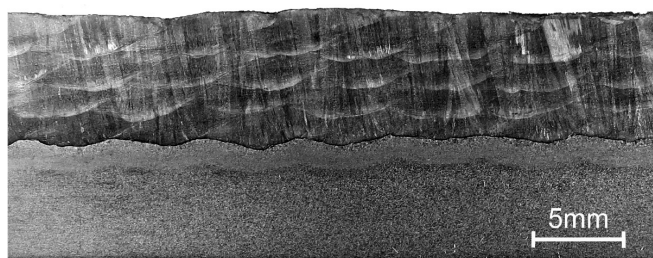
Próbkę zginania przeprowadzono zgodnie z PN-EN ISO 5173 (Badania niszczące spoin w materiałach metalowych. Badanie na zginanie). Kąt gięcia wynosił 180°. Podczas badania nie powinny ujawniać się pojedyncze pęknięcia dłuższe niż 3,0 mm w każdym kierunku. Ewentualne pęknięcia zidentyfikowane na narożach nie są poddawane interpretacji. Średnica trzpienia gnącego wynosiła 40 mm, a rozstaw rolek 70 mm. W tablicy IV przedstawiono wyniki badań z próby zginania bocznego.

Na powierzchniach rozciąganych próbek nie stwierdzono żadnych nieciągłości (naderwań, pęknięć itp.), co potwierdza poprawność doboru parametrów napawania oraz materiałów dodatkowych. Brak nieciągłości świadczy również o braku niezgodności wewnętrznych, które generują tego rodzaju defekty.

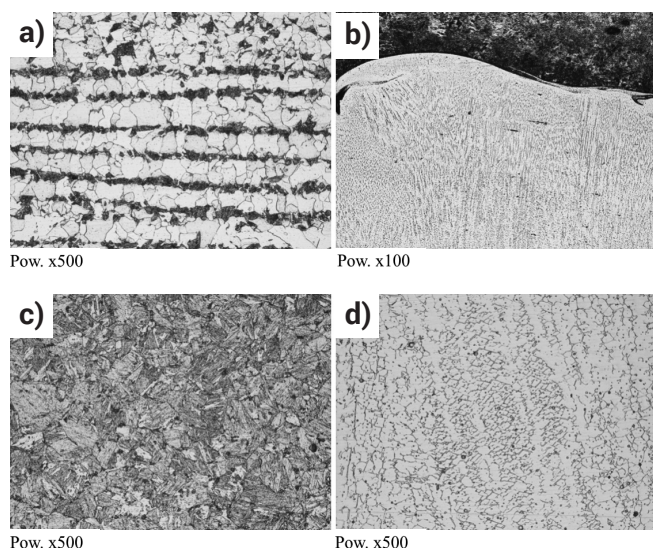
Badania metalograficzne makroskopowe i mikroskopowe

Badania metalograficzne makro- i mikroskopowe wykonano zgodnie z PN-EN ISO 17639 (Badania niszczące spawanych złączy metali. Badania makroskopowe i mikroskopowe złączy spawanych). Próbkę do badań pobrano zgodnie z rysunkiem 3 normy PN-EN ISO 15614-7. Następnie została ona poddana przygotowaniu poprzez etapowe szlifowanie papierami o odpowiedniej gradacji, a następnie polerowanie i trawienie odczynnikami Adlera (stal niestopowa) i $\text{HCl}/\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7/\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (napoina). Założono zgodnie z normą kryteria akceptacji: pęknięcia oraz inne niezgodności płaskie, oraz pojedyncze pory większe niż 2 mm nie są akceptowalne. Dla badań mikroskopowych nie dopuszcza się również pęknięć dłuższych niż 1,5 mm.

Napoina (rys. 2) charakteryzuje się równomiernym rozłożeniem poszczególnych ściegów oraz regularną linią wtopienia. Nie stwierdzono występowania żadnych niezgodności spawalniczych (pęknięć, wtrąceń żużla, pęcherzy gazowych



Rys. 2. Zgląd makroskopowy próbki napawanej
Fig. 2. Cross sections of surfaced sample



Rys. 3. Mikrostruktury poszczególnych obszarów próbki napawanej: a) materiał rodzimy, b) strefa: napoina – linia wtopienia, c) SWC, d) napoina. Trawienie stali niestopowej Nital / napoina $\text{HCl}/\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7/\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

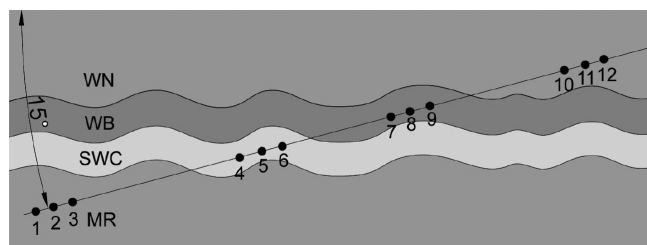
Fig. 3. Microstructures of areas of surfaced sample: a) base material, b) zone: weld bead deposit – fusion line, c) HAZ, d) weld bead deposit. Etching for carbon steel Nital / for austenitic bead $\text{HCl}/\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7/\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$

itp.), co świadczy o poprawnie opracowanej technologii oraz dużych umiejętnościach spawacza. Następnie wykonano badania metalograficzne mikroskopowe, których wyniki badań przedstawiono na rysunku 3.

Na rysunku 3a przedstawiono strukturę stali S355J2C+N, która stanowiła materiał podłoża. Zidentyfikowaną typową dla tego gatunku materiału strukturę ferrytyczno-perlityczną w układzie pasmowym bez obszarów segregacji. Na rysunku 3b widoczny jest obszar napoina-linia wtopienia. W napoinie występuje struktura austenityczna w układzie dendrytycznym. Na linii wtopienia występuje struktura o zwiększonym rozroście ziarna. Strukturę w SWC przedstawiono na rysunku 3c. Jest to perlit i ferryt iglasty w układzie Widmanstättena, co sugeruje niewielki wzrost twardości. Strukturę napoiny stanowi austenit w układzie dendrytycznym, rysunek 3d, w którym nie zidentyfikowano mikropęknięć, ani wydzieleni węglików chromu (Cr_{23}C_6) na granicach ziaren. Świadczy to o odpowiedniej ilości wprowadzonego ciepła, która zapewnia właściwe wtopienie, brak niezgodności spawalniczych typu mikropęknięcia, a jednocześnie minimalizuje ryzyko występowania korozji międzykrystalicznej.

Pomiary twardości

Pomiary twardości wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 9015 (Badania niszczące złączy spawanych metali. Badanie twardości. Część 1: Badanie twardości złączy spawanych łukowo) wg schematu przedstawionego na rysunku 4. Pomiar wykonano metodą Vickersa wg PN-EN ISO 6507-1 (Metale. Pomiar twardości sposobem Vickersa. Metoda badań). Siła obciążająca wynosiła 98 N (HV10). Badania wykonano na twardościomierzu KB 5/10/30/50 BVZ. Wyniki badań przedstawiono w tabelicy V. Kryterium akceptacji ustalono na poziomie 380HV10 (bez obróbki cieplnej) zgodnie z normą PN-EN ISO 15614-7 (tabl. 2) dla materiału podłoża, który zaszeregowany jest do grupy materiałowej 1.2 wg TR ISO 15608.



Rys. 4. Schemat pomiaru twardości w próbce napawanej: MR – materiał rodzimy, SWC – strefa wpływu ciepła, WB – warstwa buforowa napawana spoiwem 309LMo, WN – warstwy napawane spoiwem 316L

Fig. 4. Scheme of hardness measurements of the surfaced sample: MR – basic material, SWC – heat affected zone, WB – buffer layer surfaced with 309LMo, WN – layer surfaced with 316L

Materiał podstawowy charakteryzuje się typowym rozkładem twardości dla stali o strukturze ferrytyczno-perlitycznej. W obszarze SWC uzyskane twardości ($231 \div 247\text{HV}_{10}$) są poniżej założonego kryterium akceptacji (380HV_{10}) i odpowiadają wymaganiom dla urządzeń utrzymujących ciśnienie mokrych linii H_2S , czyli max. 248HV_{10} bez obróbki cieplnej. Uzyskany wynik potwierdza wyniki badań metalograficznych mikroskopowych, gdzie w obszarze SWC zidentyfikowano perlit i ferryt iglasty w układzie Widmanstättena. W warstwie buforowej oraz warstwach docelowych uzyskano również właściwe wartości. Wyniki świadczą o poprawnie zaprojektowanym i przeprowadzonym procesie napawania.

Analiza składu chemicznego

Celem napawania stali niestopowej stopiwem austenitycznym jest uzyskanie warstwy odpornej na korozję. Dlatego skład chemiczny napoiny powinien odpowiadać składowi chemicznemu stopiwa zastosowanego w procesie. W analizowanym przypadku uzyskane wartości należy odnieść do wymagań stawianych drutom próbkowym oznaczonym wg PN-EN ISO 17633-A: T 19 12 3 L R M21/C1 3. Pomiar wykonano dla wysokości warstwy 4,5 mm, ponieważ taka grubość jest przewidziana do eksploatacji. Do analizy składu chemicznego użyto spektrometru FOUNDRY-MASTER Xpert (metoda analizy FE300). Wyniki badań przedstawiono w tabeli VI.

Na podstawie wykonanych pomiarów można stwierdzić, że skład chemiczny warstwy napawanej mieści się w granicach ustalonych normą przedmiotową. Można zatem wnioskować, że właściwości eksploatacyjne będą spełniały wymagania dla czynnika roboczego H₂S.

Pomiary liczby ferrytowej FN

Pomiar liczby ferrytowej FN to jeden z elementów badań, który służy weryfikacji wykonanego procesu napawania w odniesieniu do odporności korozyjnej w środowisku czynnika roboczego, w rozpatrywanym przypadku: H₂S. Dla napawania stopiwem typu 316L zawartość ferrytu zawężona jest do zakresu 4÷10 FN. Badania wykonano zgodnie z PN-EN ISO 8249 (Spawanie. Określanie liczby ferrytu (FN) w stopiwie nierdzewnych chromowo-niklowych stali austenitycznych i ferrytyczno-austenitycznych dupleks). Do badań zastosowano ferrytoskop Feritscope FMP30 ze wzorcem Ferrit No.: 0442. Badania przeprowadzono w dwóch punktach na początku warstwy napawanej (1,2), następnie w dwóch punktach w środkowej części (3,4) oraz w dwóch punktach na końcu napoiny (5,6), przy czym wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli VII jako średnią z trzech wartości.

Tablica V. Wyniki pomiarów twardości

Table V. Hardness distribution across surfaced sample

| Miejsce pomiaru | MR | MR | MR | SWC | SWC | SWC | WB | WB | WB | WN | WN | WN |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Punkt pomiarowy | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Wynik pomiaru | 155 | 157 | 162 | 246 | 247 | 231 | 215 | 204 | 209 | 203 | 193 | 202 |

Tablica VI. Wyniki pomiaru składu chemicznego w warstwie napawanej

Table VI. Results of chemical composition measurement of the surfaced sample

| Zawartość pierwiastków badanej powierzchni, % | | | | | | | | | | |
|--|-------|------|------|-------|-------|-----------|-----------|---------|------|--------|
| Fe | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Cu | Reszta |
| 63,2 | 0,029 | 0,73 | 1,54 | 0,028 | 0,008 | 18,4 | 12,8 | 2,85 | 0,06 | 0,355 |
| Dopuszczalne wartości pierwiastków stopowych dla stopiwa 19 12 3 L wg PN-EN ISO 17633, % | | | | | | | | | | |
| - | 0,04 | 1,2 | 2,0 | 0,03 | 0,025 | 17,0-20,0 | 10,0-13,0 | 2,5-3,0 | 0,5 | - |

Tablica VII. Wyniki badań pomiaru zawartości ferrytu delta wyrażonego liczbą ferrytową (FN)

Table VII. Results of delta ferrite measurements expressed by the ferrite number (FN)

| | Punkty pomiarowe | | | | | |
|----------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Wartości zmierzone | 6,42 | 7,27 | 5,13 | 6,94 | 8,58 | 7,69 |
| Kryterium akceptacji | 4÷10 FN | | | | | |
| Wynik pomiaru | Pozytywny | Pozytywny | Pozytywny | Pozytywny | Pozytywny | Pozytywny |

Wykonane pomiary dają podstawę do stwierdzenia, że zawartość ferrytu (liczba FN) mieści się w granicach ustalonego kryterium akceptacji. Zauważono wzrost wartości liczby FN na początku i końcu napawania. Spowodowane jest to mniej stabilnymi parametrami napawania w porównaniu do środkowej części napoiny. Taka niestabilność może prowadzić do większej ilości

wprowadzonego ciepła, co może wydłużać czas stygnięcia i w konsekwencji prowadzić do wzrostu liczby FN. Należy jednak podkreślić, że uzyskane wyniki dla każdego badanego obszaru mieszczą się w przyjętym zakresie. Świadczy to o poprawnie dobranej ilości wprowadzonego ciepła, która wynika z parametrów prądowych oraz prędkości napawania.

Wnioski

1. Możliwe jest wykonanie warstw napawanych przy zastosowaniu materiału dodatkowego w postaci drutu proszkowego (proces 136), które spełniają kryteria akceptacji normy PN-EN ISO 15614-7 oraz wymagania dla urządzeń eksploatowanych w środowisku H₂S.
2. Badania nieniszczące nie wykazały występowania niezgodności spawalniczych, co potwierdziła próba zginania bocznego oraz badania metalograficzne makroskopowe.
3. Badania metalograficzne mikroskopowe ujawniły właściwe struktury w obszarze linii wtopienia, SWC oraz napoinie. W SWC zidentyfikowano perlit i ferryt iglasty w układzie Widmanstättena, w napoinie strukturę austenityczną w układzie dendrytycznym. W linii wtopienia nie zaobserwowano mikropęknięć i mikro wtrąceń. Dla zastosowanych powiększeń nie stwierdzono występowania węglików chromu Cr₂₃C₆.
4. Nie wykazano nieakceptowalnego wzrostu twardości w obszarze SWC, a uzyskane wartości (231÷247HV10) są niższe od przyjętego kryterium akceptacji 380HV10.
5. Pomiary zawartości ferrytu delta oraz analiza składu chemicznego na powierzchni napawanej pozwalają stwierdzić, że uzyskana warstwa charakteryzuje się właściwą odpornością na korozję.

Autorzy dziękują firmie SECESPOL Sp. z o.o. z Nowego Dworu Gdańskiego za wykonanie złączy próbných wykorzystanych w badaniach

Literatura

- [1] Chmielewski T.: Projektowanie procesów technologicznych – Spawalnictwo. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.
- [2] Chmielewski T., Golański D.: Znaczenie spawalnictwa w procesie remanufacturingu. Przegląd Spawalnictwa 6/2011.
- [3] Rogalski G., Fydrych D., Walczak W.: Zastosowanie zgrzewania wybuchowego do wytwarzania kompozytów metalowych z osnową aluminiową. Przegląd Spawalnictwa 6/2013.
- [4] Pociła N., Tuz L.: Ocena mikrostruktury i wybranych własności mechanicznych złączy zgrzewanych wybuchowo po obróbce cieplnej. Przegląd Spawalnictwa 4/2016.
- [5] Znamirovski Z., Kozerski S., Łatka L., Pawłowski L.: Wpływ przygotowania powierzchni na elektronową emisję połową powłok TiO₂ natryskanych plazmowo z zawieszin. Przegląd Spawalnictwa 3/2015.
- [6] Chmielewski T., Golański D., Włosiński W., Zimmerman J.: Utilizing the energy of kinetic friction for the metallization of ceramics. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences 1/2015.
- [7] Smoleńska H., Kończewicz W., Łabanowski J.: Regeneracja zaworów silników okrętowych metodą napawania plazmowego. Przegląd Spawalnictwa 9/2011.
- [8] Smoleńska H., Łabanowski J., Kończewicz W.: Regeneration of marine engine valves using laser surfacing. Welding International 2/2016.
- [9] Kik T., Górka J., Czupryński A., Martyniszyn A.: Napawanie krawędzi przedmiotów metodami TIG i PTA. Przegląd Spawalnictwa 9/2011.
- [10] Gontarz G., Golański D., Chmielewski T.: Powłoki intermetaliczne otrzymywane w procesie przetapiania i stopowania. Przegląd Spawalnictwa 9/2015.
- [11] Pfeifer T., Czwornóg B.: The effect of plasma surfacing parameters on the geometry and structure of overlay welds. Institute of Welding Bulletin 4/2015.
- [12] Bęczkowski R., Gućwa M.: Kwalifikowanie napawania warstw trudnościeralnych pracujących w warunkach przemysłu cementowego. Przegląd Spawalnictwa 9/2015.
- [13] Krajewski A., Hudycz M., Grześ J.: Wpływ drgań ultradźwiękowych na kształt i strukturę napoin ze stopu aluminium wykonanych metodą MIG. Przegląd Spawalnictwa 6/2014.
- [14] Tuz L., Mrozek M.: Ocena wpływu kąta pochylecia elektrody na kształt napoiny. Mechanik 10/2012.
- [15] Skorupa A., Góral T.: Wpływ technologicznych parametrów napawania na geometrię napoin z brązu układanych na podłożu stalowym metodą MIG. Przegląd Spawalnictwa 3/2012.
- [16] Bober M., Senkara J.: Mikrostruktura kompozytowych powłok Ni-ZrC napawanych plazmowo. Przegląd Spawalnictwa 10/2015.
- [17] Rogalski G., Prokop K., Fydrych D., Łabanowski J.: Badania złączy spawanych bimetalu zgrzewanego wybuchowo stali niestopowej Grade 60 ze stopem Monel 400. Przegląd Spawalnictwa 6/2014.
- [18] Rogalski G., Fydrych D.: Kwalifikowanie technologii spawania wg PN-EN ISO 15614-8 na przykładzie płyt sitowych w U-rurowych wymiennikach ciepła. Przegląd Spawalnictwa 2/2012.
- [19] Rogalski G., Łabanowski J., Fydrych D., Świerczyńska A.: Wpływ obróbki cieplnej na właściwości spawanych austenitycznych rur wymienników ciepła. Przegląd Spawalnictwa 6/2014.
- [20] Świerczyńska A., Rogalski G., Fydrych D.: Badania struktury i właściwości spawanych austenitycznych rur wymienników ciepła. Przegląd Spawalnictwa 5/2010.
- [21] Rogalski G., Fydrych D., Landowski M., Łabanowski J.: Spawalność tytanu Grade 2 na przykładzie płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła. Przegląd Spawalnictwa 10/2015.
- [22] www.secespol.com.pl
- [23] Świerczyńska A.: Effect of technological factors on diffusing hydrogen content in the weld deposit of rutile flux-cored wires. Institute of Welding Bulletin 5/2013.