

Grzegorz Golański
Maciej Lachowicz
Jacek Słania
Joanna Kępa
Piotr Marszałek

Napoiny z nadstopu Haynes® 625 na ścianach szczelnych ze stali 16Mo3

Padding welds of Haynes® 625 superalloy on the sheet pile walls made of 16Mo3 steel

Streszczenie

W pracy przedstawiono badania mikrostruktury i właściwości mechanicznych napawanej rury ze stali 16Mo3 nadstopem na bazie niklu Haynes® 625. Napoina napawana była metodą MIG (131). Przeprowadzone badania makro- i mikroskopowe wykazały prawidłową budowę napoiny bez niezgodności spawalniczych. Badana napoina charakteryzowała się budową dendrytyczną o kryształach pierwotnych narastających w kierunku odprowadzania ciepła. Wykazano, że zawartość żelaza w strefie przypowierzchniowej nie przekracza 7%, a samo połączenie stal/nadstop wykazuje wyższe właściwości niż łączone materiały.

Słowa kluczowe: napawanie, napoina, badanie niszczące, stop niklu

Abstract

Examinations of a microstructure and mechanical properties of a nickel superalloy Haynes® 625 padding weld made by MIG (131) method on the surface of a steel pipe 16Mo3 were taken. Macro and microscopic examinations showed a proper structure of a padding weld without any welding discrepancies. Examined padding weld was characterised by a dendrite structure with the primary crystals growing up to the heat abstraction. It was proved that the content of iron in the surface area does not exceed 7%, and a combination of steel/superalloy shows the highest properties in comparison to joined components.

Keywords: surfacing by welding, surfacing weld, destructive testing nickel alloy

Wstęp

Wymogi zachowania bezpieczeństwa energetycznego oraz zagadnienia ekonomiczne produkcji energii elektrycznej (obniżenia kosztów jej wytwarzania) wymagają zastosowania w energetyce paliw alternatywnych – biomasy, śmieci, odpadów itp. Stosowanie nowych paliw podyktowane jest również ograniczeniem emisji CO₂ do atmosfery przy dążeniu do zachowania wysokiej sprawności bloków energetycznych. Współspalanie paliwa z biomasy z odpadami, czy też śmieciami w kotłach przemysłowych skutkuje tworzeniem

się w spalinach bardzo agresywnych chlorków, czy też fluorków, co prowadzi do bardzo intensywnej korozji wysokotemperaturowej [1, 2]. Wysoka temperatura oraz chemicznie agresywne spaliny wymagają odpowiednich zabezpieczeń stykających się z nimi elementów kotłów. Jednymi z najbardziej narażonych na działanie agresywnego środowiska korozyjnego są rury wymienników ciepła.

Jedną z metod zwiększenia trwałości elementów kotłów najbardziej narażonych na korozję jest napawanie powłok na bazie stopów (nadstopów) niklu. Nadstopy niklu charakteryzują się bardzo wysokimi właściwościami

Dr hab. inż. Grzegorz Golański – Politechnika Częstochowska, **dr inż. Maciej Lachowicz** – Politechnika Wroclawska, **dr hab. inż. Jacek Słania, prof. PCz** – Politechnika Częstochowska, **mgr inż. Joanna Kępa** – Politechnika Częstochowska, **inż. Piotr Marszałek** – Sefako S.A.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: jacek_slania@poczta.onet.pl

użytkowymi w ekstremalnie trudnych warunkach eksploatacyjnych, do których możemy zaliczyć m.in.: możliwość pracy w sposób ciągły w temperaturze do 1250 °C, przy zmiennych i dynamicznych obciążeniach oraz w bardzo agresywnym środowisku korozyjnym gazów, związków siarki, azotu i węgla [2, 3].

Technologia napawania elementów kotła nadstopami niklu na skalę przemysłową jest stosunkowo nowa, co wymaga kompleksowych badań mających na celu zapoznanie się z wpływem powyższego procesu na uzyskanie wysokiej jakości napoin spełniających wymagania odbiorców. W pracy przedstawiono ocenę mikrostruktury i właściwości mechanicznych napoiny – nadstopu niklu Haynes® 625 napawanego na stal 16Mo3 (16M).

Materiał i metodyka badań

Badania przeprowadzono na odcinku rury ze stali 16Mo3 (16M) napawanej stopem Haynes® 625 metodą MIG (131). Wymagany skład chemiczny oraz właściwości mechaniczne napawanego nadstopu niklu przedstawiono odpowiednio w tablicach I i II.

Badania mikroskopowe wykonano na konwencjonalnie przygotowanych zglądach metalograficznych. Zglądy trawiono dwustopniowo: materiał podłoża stal – nitałem (Mi19Fe), napoina – trawienie elektrolityczne w odczynniku ML3. Parametry prądowo-napięciowe elektrolitycznego trawienia napoiny przedstawiono m.in. w pracach [4, 5]. Obserwację i rejestrację obrazów mikrostruktur prowadzono za pomocą mikroskopu świetlnego Axiovert 25 (LM) oraz skaningowego mikroskopu elektronowego JOEL JSM 5800LV (SEM). Pomiar mikrotwardości metodą Vickersa wykonano za pomocą mikrotwardościomierza Future-Tech FM-7, stosując obciążenie wgłębnika 100 g (0,91 N).

Do analizy zawartości żelaza na powierzchni napoiny wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy JOEL JSM 6610LV współpracujący ze spektrometrem rentgenowskim EDS Oxford Instruments X – Max.

Do badania przyczepności warstwy napawanej użyto urządzenia Revetest XPress Plus (*Scratch Test*), stosując diamentowy wgłębnik Rockwella. Test ten wykonano przy zastosowaniu następujących parametrów: zadane obciążenie 20, 35 i 50 N; długość zarysowania 3 mm; prędkość zarysowania 1 mm/min.

Badania makroskopowe

Badania makroskopowe napoiny nie wykazały niezgodności w linii wtopienia, nie obserwowano również przyklejeń, pęcherzy ani innych nieciągłości. Brak niezgodności spawalniczych na powierzchni wskazuje na zachowanie czystości powierzchni napawanej rury.

Makrostrukturę badanej napoiny przedstawiono na rysunku 1. Określona grubość napoiny (napawanej na powierzchnię rury powłoki) nie przekraczała 3 mm. Jest to wartość nieznacznie wyższa od uznawanej za optymalną 2,5 mm [6], co związane jest z ceną stopów niklu, a z drugiej strony z różnicą w przewodności cieplnej stopów niklu i żelaza. Napoina napawana była jednowarstwowo.



Rys. 1. Zgląd makroskopowy badanego elementu
Fig. 1. Metallographic specimen of an examined element

Tablica I. Wymagany skład chemiczny nadstopu Haynes® 625, % mass. (Ni)

Table I. A required chemical composition of Haynes NiCro625 superalloy, % mass. (Ni balance)

Co	Fe	Cr	Mo	Nb + Ta	Mn	Si	Al	Ti	C
max 1	max 5	20÷23	8÷10	3,15÷3,75	max 0,50	max 0,50	max 0,40	max 0,40	max 0,10

Tablica II. Minimalne wymagane właściwości mechaniczne nadstopu Haynes NiCro625* w temperaturze pokojowej i 650 °C

* – stop po przeróbce plastycznej na zimno i wyżarzaniu w temperaturze 1050 °C

Table II. Minimal required mechanical properties of Haynes NiCro625* superalloy in the room temperature and in 650 °C

* – superalloy after cold working and annealing in 1050 °C

Temperatura, °C	UTS, MPa	YS, MPa	El., %
pokojowa	905	490	48.5
650	760	370	55.6

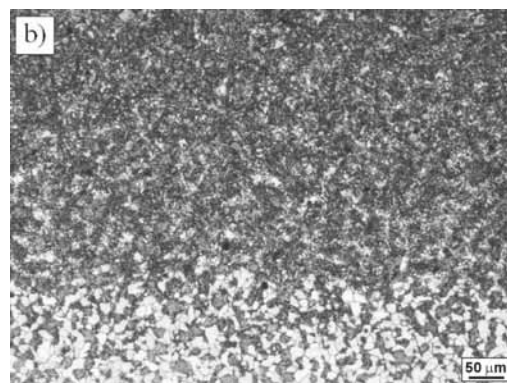
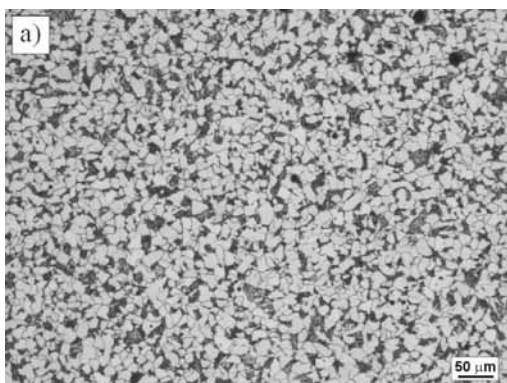
Badania mikroskopowe

Materiał podłoża – stal 16Mo3 charakteryzowała się typową dla tego gatunku stali mikrostrukturą ferrytyczno – perlityczną (rys. 2a). W strefie wpływu ciepła (SWC) obserwowano zróżnicowaną mikrostrukturę: od martenzytycznej przez martenzytyczno – bainityczną do ferrytyczno – bainitycznej (rys. 2b). Wąska SWC w materiale podłoża wskazuje na zastosowanie wymuszonego wewnętrznego chłodzenia rury.

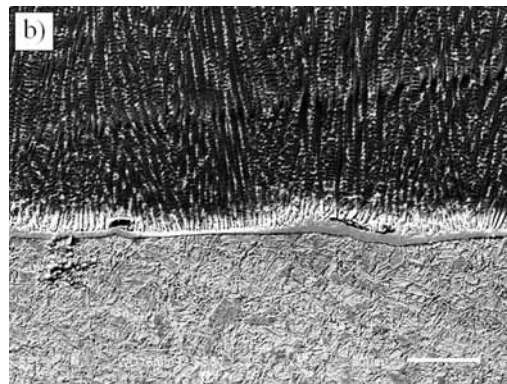
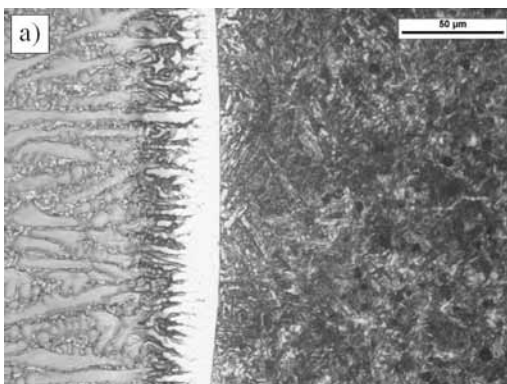
Napoina charakteryzowała się prawidłowym połączeniem z materiałem podłoża. Obserwowano kryształy pierwotne o charakterystycznej budowie dendrytycznej, narastające do powierzchni rury zgodnie z kierunkiem odprowadzania ciepła (rys. 3).

Jednym z warunków dopuszczenia technologii napawania rur wymienników ciepła w spalarniach odpadów

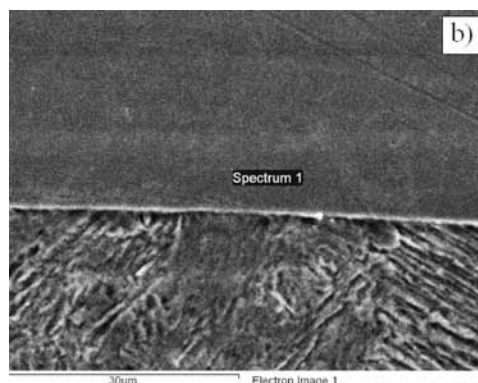
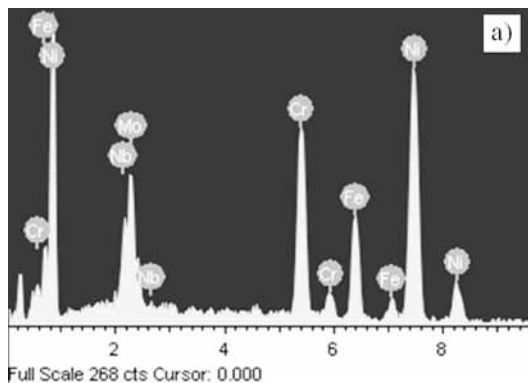
jest ocena zawartości żelaza w warstwie powierzchniowej napoiny [7]. Zaleca się, aby w warstwie napoiny napawanej automatem zawartość żelaza nie przekraczała 7%, natomiast metodą spawania ręcznego 10%. Wyższa zawartość żelaza może powodować tworzenie tlenków żelaza Fe_2O_3 , charakteryzujących się warstwową i nieciągłą budową, co sprzyja ich wykuszaniu w czasie eksploatacji [7, 8]. Badania wykazały w badanej napoinie średnią zawartość żelaza na poziomie $3,7 \pm 6,4\%$. Przykładowe widmo promieniowania rentgenowskiego (X-ray) napoiny w warstwie przypowierzchniowej przedstawiono na rysunku 4. Jednym z istotnych czynników wpływających na wymaganą zawartość żelaza w warstwie przypowierzchniowej jest energia liniowa łuku, która nie powinna przekraczać 3 kJ/cm, jak również wewnętrzne wymuszone chłodzenia zapewniające właściwy odbiór ciepła [9, 10].



Rys. 2. Mikrostruktura stali 16Mo3: a) materiał rodzimy, b) strefa wpływu ciepła
Fig. 2. A microstructure of 16Mo3 steel: a) base material, b) heat-affected zone



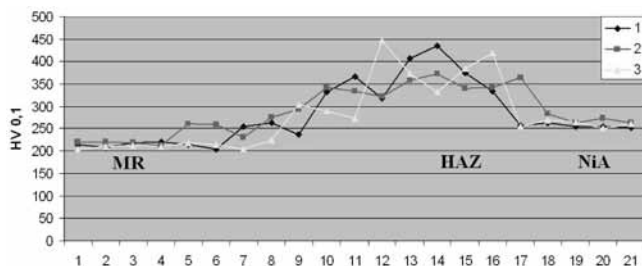
Rys. 3. Mikrostruktura napawanej warstwy w linii wtopienia: a) LM; b) SEM
Fig. 3. A microstructure of a pad welded layer in the line of a fusion: a) LM; b) SEM



Rys. 4. Widmo promieniowania rentgenowskiego (X-ray) napoiny w warstwie przypowierzchniowej (a); obszar wykonania analizy (b)
Fig. 4. X-ray spectrum of a padding weld in a surface layer (a); an area of making an analysis (b)

Pomiar mikrotwardości

Rozkład mikrotwardości na przekroju napawanej rury przedstawiono na rysunku 5. Można zaobserwować, że stal – materiał podłoża charakteryzuje się twardością na poziomie ok. 210÷220 HV_{0,1}; obecność w SWC martenzytu powodowała wzrost twardości do wartości ok. 360 HV_{0,1}; mikrotwardość napoiny wynosiła ok. 260 HV_{0,1}.

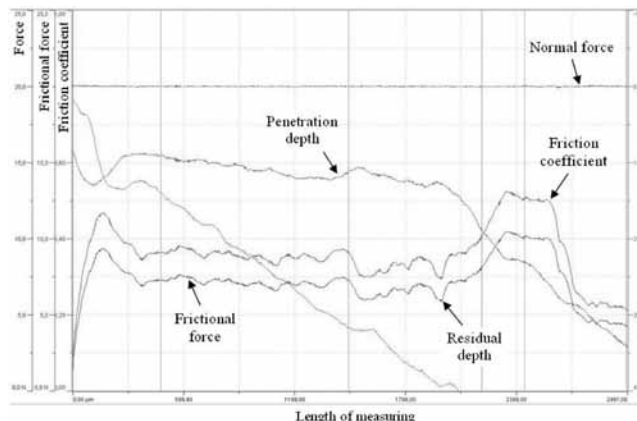


Rys. 5. Rozkład mikrotwardości HV_{0,1} na przekroju napawanego elementu, gdzie: MR – materiał rodzimy, HAZ – strefa wpływu ciepła, NiA – stop niklu

Fig. 5. An arrangement of microhardness HV_{0,1} on an element of a padding weld section, where MR stands for a base material, HAZ is a heat-affected zone, NiA is a nickel alloy

Test zarysowania – Scratch Test

Przykładowy wykres uzyskany w teście zarysowania przedstawiono na rysunku 6. Badania za pomocą *Scratch Test* pozwoliły na określenie współczynników tarcia, głębokości zarysowania oraz sił tarcia dla napoiny i materiału podłoża (stali), a także wykazały, że połączenie stal/nadstop niklu wykazuje wyższe właściwości niż właściwości łączonych materiałów.



Rys. 6. Wyniki uzyskane w teście zarysowania dla zadanej siły 50 N
Fig. 6. The results obtained in the Scratch Test for a preset of 50 N force

Wnioski

Przeprowadzono badania mikrostruktury i właściwości mechanicznych napoiny z nadstopu niklu Haynes® 625 naniesionej metodą MIG na powierzchnię rury ze stali 16Mo3. Wykazano, że zastosowane parametry napawania zapewniają uzyskanie połączenia nadstop/stal bez niezgodności spawalniczych, o wymaganej zawartości żelaza (nieprzekraczającej

7%) na powierzchni napoiny, wąskiej SWC oraz wysokich właściwościach określonych za pomocą testu zarysowania (*Scratch Test*). Jedynym stwierdzonym zastrzeżeniem była grubość napoiny wyższa o ok. 20% od zalecanej, niemniej jednak istnieje możliwość wykonywania napoiny o wymaganej jakości na rurze wymiennika ciepła.

Literatura

- [1] Uussitalo M. A., Vuoristo P. M. J., Mantyla T. A.: High temperature corrosion of coatings and boiler steels in reducing chlorine – containing atmosphere, *Surf. Coat., Technol.*, 161, 2002, 275-285.
- [2] Adamiec J., Kierzak A.: Padding of the components of waste combustion boilers with the use nickel alloys, *Inżynieria Materiałowa*, 4, 2008, 380-385.
- [3] Mikułowski B.: *Stopy żaroodporne i żarowytrzymałe – nadstopy*, Wyd. AGH, Kraków 1997.
- [4] Haynes 625 alloy – High temperature alloys, Haynes Inter. Publ., 2001.
- [5] Lachowicz M.: Microstructure analyses of the padding layers on superalloy Inconel 713C, *Inżynieria Materiałowa*, 4, 2011, 525-528.
- [6] Lachowicz M., Dudziński W., Podrez-Radziszewska M.: TEM observation of the heat affected zone in electron beam welded superalloy Inconel 713C, *Mater. Charact.*, 59, 2008, 560-566.
- [7] Rozmus-Górnikowska M., Blicharski M., Kusiński J., Paćko M., Kusiński L., Marszycki M.: Influence of boiler pipes cladding methods on their microstructure and properties, *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, 4, 2012, 260-266.
- [8] Lippold J. C., Kimur S. D., DuPont J. N.: *Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys*, Wiley Publ. 2009.
- [9] Adamiec P., Adamiec J.: Aspects of pad welding of waste incineration boiler elements with Inconel 625 and 686 alloys, *Przegląd Spawalnictwa*, 5-6, 2006, 11-14.
- [10] Adamiec J.: Surfacing by welding elements of furnace for waste material burning using nickel alloys, in *Materials and technology for construction of supercritical boilers and waste plants*, ed. A. Hernas, SITPH Publ., Katowice, 2009, 294-315.