

Właściwości i struktura złączy spawanych doczołowo z rury kompozytowej 3R12/4L7 przeznaczonych do pracy w przemyśle energetycznym

The properties and structure of the butt-welded joints of composite tube 3R12/4L7 intended for use in power industry

Streszczenie

W pracy przedstawiono technologię spawania innowacyjnej rury kompozytowej w postaci złącza doczołowego. Celem prowadzonych badań była ocena jakości złącza spawanego z rury kompozytowej. Połączenie spawane złożone z rur ze stali 3R12/4L7 zostało poddane badaniom makroskopowym i mikroskopowym oraz pomiarom twardości. Uzyskane wyniki świadczą o wysokiej jakości połączenia spawanego, a zastosowana technologia może w przyszłości posłużyć inżynierom spawalnikom, technologom oraz konstruktorom w projektowaniu złączy z innowacyjnego materiału.

Słowa kluczowe: materiały bimetalowe; rura kompozytowa; doczołowe złącze rury kompozytowej; materiały dla energetyki

Abstract

The paper presents the developed welding technology innovative composite pipe in the form of a butt-welded joint. The object of the study was to assess the quality of the welded joint with the composite pipe. The welded joint made of steel 3R12/4L7 has been tested macroscopic and microscopic, then measured for hardness with Vickers method. The results show high quality of the weld joint, and the technology can be used in the future welding engineers, technologists and engineers in the design of the connectors on the innovative material.

Keywords: bimetallic materials; composite tube; butt-welded joints of composite pipe

Wstęp

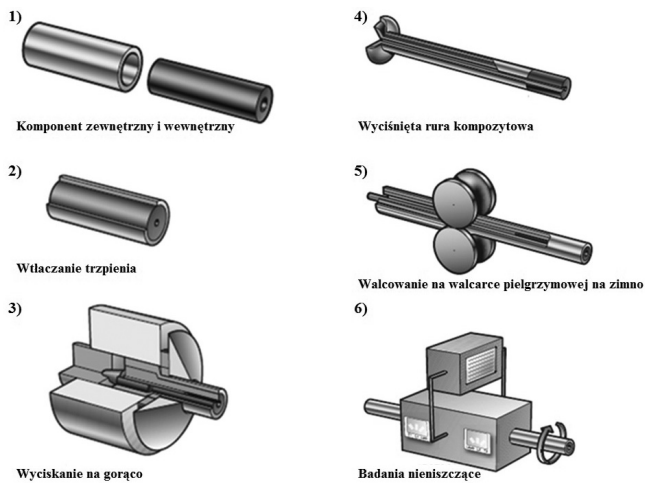
W przemyśle energetycznym dominuje dążenie do ciągłego ulepszania wykorzystywanych technologii oraz materiałów ze względu na coraz bardziej restrykcyjne wymagania Unii Europejskiej, w myśl których do 2020 roku Polska zobowiązała się do 20% redukcji gazów cieplarnianych oraz ograniczenia zużycia energii, a także zwiększenia udziału źródeł odnawialnych do 20% [1]. Z racji powyższego, wymagana jest niezawodność stosowanych materiałów oraz ich trwałość i ekonomiczność, a te wytyczne można spełnić przy zastosowaniu odpowiednio dobranego procesu spawania. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań przemysłowych dotyczących analizy procesu spawania na innowacyjnym materiale, jakim jest rura kompozytowa ze stali 3R12/4L7. Rura ta jest rozwiązaniem nowej generacji, które łączy w sobie dwa materiały o strukturze austenitycznej oraz ferrytyczno-perlitycznej i znajduje zastosowanie wszędzie tam, gdzie warunki zewnętrzne i wewnętrzne w jakich pracuje materiał, wymagają właściwości materiałów, które nie mogą być spełnione przez jeden materiał. Dwa wspomniane stopy metalurgiczne zostały ze sobą połączone w celu osiągnięcia dobrych właściwości transferu cieplnego, wyższej odporności korozyjnej oraz niskiej rozszerzalności cieplnej. Stal 3R12 (X2CrNi18-10) zapewnia wysoką odporność

korozyjną, dlatego w rurze kompozytowej znajduje się od strony zewnętrznej, natomiast od strony wewnętrznej, gdzie pojawiają się większe odkształcenia plastyczne z powodu oddziaływania ciśnienia na element, zastosowano materiał 4L7 (P235GH). Dążąc do spełnienia wymagań dotyczących redukcji gazów cieplarnianych oraz intensyfikacji źródeł odnawialnych, aplikacja rury 3R12/4L7 opiera się przede wszystkim na elementach takich jak ściany szczelne, węzownice przegrzewaczy pary w kotle na parametry ultra nadkrytyczne, kotły odzysknicowym, elementach przesyłowych pomiędzy komorą dopalającą a kotłem odzysknicowym w celu przekształcenia odpadów palnych oraz komunalnych na energię, a także w chłodnicach gazu syntezowego [2÷8]. Warto zauważyć, że innowacyjność rur kompozytowych stosowanych bez szwu jest także związana z ich technologią wytwarzania, którą schematycznie przedstawiono na rysunku 1. Technologia wytwarzania rury kompozytowej zaczyna się od odlewanych komponentów – rury zewnętrznej oraz wewnętrznej. Następnie są one ze sobą łączone i wyciskane na gorąco. Przed procesem wyciskania umieszcza się w środku rury trzpień, aby zapobiec zmianie średnicy wewnętrznej. Poprzez proces wyciskania zmniejsza się średnica rur i następuje stałe połączenie

Mgr inż. Natalia Konieczna – Instytut Nauki o Materiałach Politechniki Śląskiej.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: natalia.konieczna@polsl.pl

dwóch komponentów. Kolejnym etapem wytwarzania jest walcowanie na zimno w walcarku pielgrzymowej dwuwalcowej, a operacja ta jest zastosowaną innowacją w procesie wytwarzania rury ze względu na niewielką zmianę średnicy w stosunku do wejściowego wymiaru rury. Ostatnim etapem jest badanie wyrobu poprzez badania nieniszczące, w ramach których wykonuje się badania prądami wirowymi (ET) [3,9].



Rys. 1. Proces technologii wytworzenia rury kompozytowej [3]
Fig. 1. The process technology for producing a composite pipe [3]

W pracy [2] przedstawiono wyniki badań złączy w konfiguracji rura 3R12/4L7 – płaskownik X6CrNi18-10, które będą mogły być w przyszłości wykorzystane do łączenia ścian szczelnych, natomiast brak jest informacji w literaturze o łączeniu rur kompozytowych 3R12/4L7, np. w wyniku prac montażowych lub naprawczych. Celem pracy jest zapoznanie czytelnika z technologią spawania złączy

doczołowych 3R12/4L7, aby zapobiec w przyszłości problemom związanym ze spawaniem tego materiału.

Materiał i metodyka badań

Badania przeprowadzono na doczołowych złączach spawanych z rury kompozytowej 3R12/4L7, której skład chemiczny został przedstawiony w tabelicy I, natomiast właściwości mechaniczne rury w tabelicy II.

Złącze doczołowe o wymiarach $\varnothing 50,80 \times 5,08$ mm (z czego grubość rury 3R12 wynosiła 1,30 mm, natomiast grubość rury 4L7 to 3,78 mm), zostało wykonane przy użyciu nietopliwej elektrody wolframowej z osłoną argonu (TIG). Parametry procesu spawania złącza doczołowego przedstawiono w tabelicy III. Jako materiał dodatkowy wykorzystano drut spawalniczy OK Tigrod 309LSi wg normy EN ISO 14343-A: W 23 12 L Si oraz OK Tigrod 13.09 wg normy EN ISO 21952-A: W Mo Si. Drut spawalniczy 309LSi użyty do spawania stali 3R12 o strukturze austenitycznej, natomiast drutem 13.09 wykonano połączenie stali 4L7 o strukturze ferrytyczno-perlitycznej.

Badania metalograficzne prowadzono na zglądzie metalograficznym trawionym selektywnie. Rurę ze stali ferrytyczno-perlitycznej (4L7) oraz spoinę przy rurze 4L7 trawiono chemicznie w 3% nitalu, natomiast rurę 3R12 o strukturze austenitycznej i spoinę przy rurze 3R12 trawiono elektrolitycznie w 30% wodnym roztworze kwasu szczawowego przy napięciu 6 V w czasie 30 s. Badania metalograficzne przeprowadzono na stereoskopowym mikroskopie świetlnym Olympus SZX 9 przy powiększeniach do 50x (SM) oraz na mikroskopie świetlnym Olympus GX-71 w technice obserwacji w polu jasnym przy powiększeniach do 1000x (LM). Badania strukturalne zostały uzupełnione pomiarami twardości złącza spawanego metodą Vickersa przy obciążeniu wynoszącym HV1.

Tablica I. Skład chemiczny złącza spawanego rury kompozytowej, % mas.

Table I. Chemical composition of the welded joint of composite pipe and flat bar, % mass.

Stal	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
4L7 (P235GH)	0,192	0,274	0,696	0,007	0,010	0,076	0,050	0,018
	V	Ti	Cu	Al	Nb	N		
	0,002	0,005	0,086	0,009	0,00	0,0069		
3R12 (X2CrNi18-10)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
	0,012	0,36	1,19	0,023	0,0052	18,47	10,12	0,29
	V	Ti	Cu	Al	Nb	N		
	0,050	0,009	0,35	0,003	0,01	0,052		

Tablica II. Właściwości mechaniczne rury 3R12/4L7 podane przez producenta

Table II. Mechanical properties 3R12/4L7 tube according to producer

Stal	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A [%]
3R12/4L7	350-351	501-505	32-34

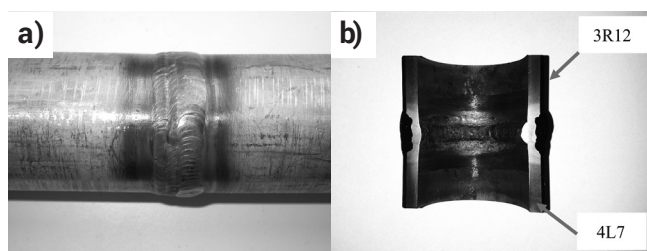
Tablica III. Parametry spawania złącza doczołowego rury kompozytowej 3R12/4L7

Table III. The parameters of butt-welded joint with the 3R12/4L7 composite tube

Parametry spawania TIG				
Natężenie [A]	Rodzaj prądu/biegunowość	Napięcie [V]	Przepływ gazu [l/min]	Temperatura międzyścigowa [°C]
130	DC (-)	11	8-10	150

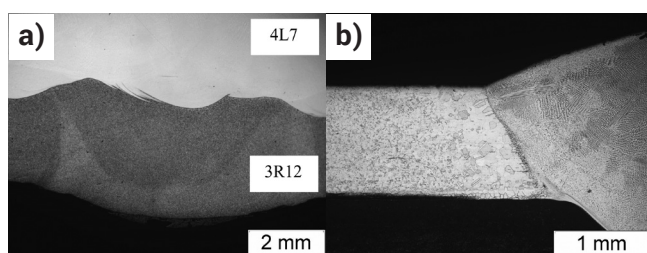
Wyniki i ich dyskusja

Analiza wyników badań wizualnych wykonanych zgodnie z wymaganiami PN-EN ISO 17637:2011 nie ujawniła niezgodności spawalniczych zarówno od strony lica, jak i grani, a także zaobserwowano, iż złącze spawane posiada prawidłową geometrię (rys. 2a i rys. 2b). Doczołowe złącze spawane jest wyraźnie podzielone w taki sposób, że materiał rury 3R12 wraz ze spoiną jest ciemniejszy, natomiast materiał stali 4L7 wraz ze spoiną charakteryzują metalicznym połyskiem (rys. 1b), co nie jest jednoznaczne, ponieważ stal 4L7 jest stalą niestopową o zwiększonej zawartości węgla w porównaniu do stali 3R12. Badania mikrostruktury pozwoliły stwierdzić, iż uzyskano pełny przetop, a spoina została wykonana prawidłowo, stosując zróżnicowany pod względem składu chemicznego materiał dodatkowy (rys. 3a). Analiza mikrostruktury za pomocą mikroskopu świetlnego ujawniła rozrost ziarn austenitu w SWC w porównaniu do materiału rodzimego stali 3R12 (rys. 3b). Potwierdzono również, że materiał stali 3R12 charakteryzuje się strukturą austenityczną (rys. 4a), natomiast rura 4L7 posiada strukturę ferrytyczno-perlityczną (rys. 4b). Lico spoiny wykonane drutem spawalniczym OK Tigrod 309LSi charakteryzuje się strukturą austenityczną o budowie dendrytycznej (rys. 4c), co spełnia założone wymagania dotyczące procesu spawania. Grań spoiny jest zbliżona do materiału rodzimego rury 4L7 pod względem strukturalnym, gdyż w obu przypadkach występuje struktura ferrytyczno-perlityczna (rys. 4d), jednakże w materiale rodzimym rury 4L7 obserwuje się strukturę drobnoziarnistą w porównaniu do grani spoiny złącza. Na rysunku 4e przedstawiono SWC rury 3R12 oraz miejsce łączenia komponentu wewnętrznego (4L7) z komponentem zewnętrznym (3R12). W SWC zaobserwowano rozrost ziarn austenitu pod wpływem oddziaływania cyklu cieplnego spawania. Rozrost ziarn austenitu był również obserwowany na granicy wtopienia dwóch materiałów, co jest charakterystyczne dla technologii wytwarzania rur – walcowania pielgrzymowego. Dla SWC rury 4L7 charakterystyczna była struktura ferrytyczno-bainityczna (rys. 4f).



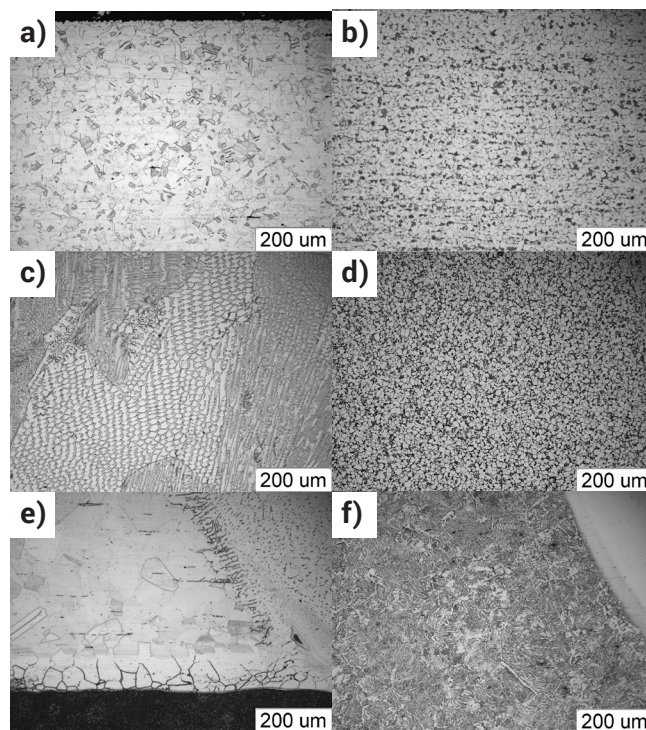
Rys. 2. a) Makrostruktura doczołowego złącza spawanego metodą TIG rury kompozytowej 3R12/4L7, b) Makrostruktura doczołowego złącza spawanego złożonego z rury 3R12/4L7

Fig. 2. a) Macrostructure of butt-welded joint by TIG composite 3R12/4L7 tube, b) Macrostructure of the butt-welded joint consisting of 3R12/4L7 tube



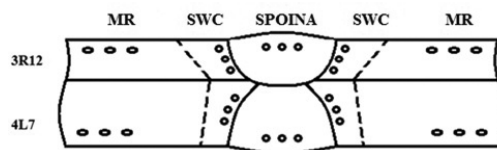
Rys. 3. a) Mikrostruktura spoiny rury 3R12/4L7, b) Mikrostruktura SWC oraz spoiny od strony od strony rury 3R12

Fig. 3. a) The microstructure of weld 3R12/4L7 tube, b) The microstructure of HAZ 3R12 tube



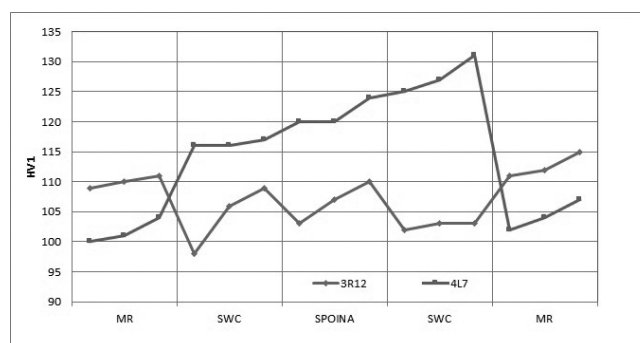
Rys. 4. a) Mikrostruktura rury 3R12, b) Mikrostruktura rury 4L7, c) Mikrostruktura spoiny przy rurze 3R12, d) Mikrostruktura spoiny przy rurze 4L7, e) SWC rury 3R12 wraz z przedstawionym miejscem wtopienia materiałów, f) SWC rury 4L7

Fig. 4. a) The microstructure of 3R12 tube, b) The microstructure of 4L7 tube, c) The microstructure of weld 3R12 tube, d) The microstructure of weld 4L7 tube; e) Heat affected zone microstructure of the 3R12 and presented place of penetration both materials, f) Heat affected zone microstructure of the 4L7



Rys. 5. Miejsca pomiaru twardości złączy spawanych doczołowo rury 3R12/4L7 metodą Vickersa

Fig. 5. The places of measurements of Vickers hardness butt-weld joint 3R12/4L7 tube



Rys. 6. Wyniki twardości HV1 doczołowego złącza spawanego z rury 3R12/4L7

Fig. 6. The results of measurements of HV1 hardness in butt-welded joint 3R12/4L7 tube

Pomiary twardości doczołowego złącza spawanego wykonano w miejscach oznaczonych na rysunku 5. Połączenie podzielono na pięć badanych obszarów zarówno od strony stali austenitycznej 3R12, jak i od strony stali ferrytyczno-perlitycznej 4L7. Wyniki pomiarów twardości HV1 zostały

przedstawione na rysunku 6. Pomiar twardości metodą Vickersa prowadzono również w obszarze stali austenitycznej, aby określić różnice twardości pomiędzy trzema kolejnymi punktami pomiaru, by różnica ta była mniejsza niż 100 HV. Analiza pomiarów wskazuje, że najwyższą twardością charakteryzowała się SWC rury 4L7 (116÷131 HV1), a najniższą SWC rury 3R12 (98÷109 HV1). Twardszą częścią

spoiny okazała się być grań o strukturze ferrytyczno-perlitycznej (120÷124 HV1) aniżeli lico o strukturze austenitu (103÷110 HV1). Znaczne zróżnicowanie, a także stosunkowo niskie uzyskane wyniki badania twardości złącza doczołowego mogą wynikać z odmiennych użytych materiałów dodatkowych w trakcie spawania, a także z ich wzajemnego mieszania się z materiałem rury.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań metalograficznych i analizy twardości doczołowego złącza spawanego rury kompozytowej 3R12/4L7 stwierdzono, że dobrana technologia spawania metodą TIG jest prawidłowa i wymaga zastosowania dwóch zróżnicowanych materiałów dodatkowych: OK Tigrod 309LSi oraz OK Tigrod 13.09.

Analiza mikrostruktury potwierdziła strukturę austenityczną dla rury 3R12 i ferrytyczno-perlityczną dla rury 4L7. Spoina została wykonana tak, aby od strony lica znajdowała się struktura austenityczna o budowie dendrytycznej, natomiast od strony grani struktura ferrytyczno-perlityczna. Powyższy fakt może wpływać ograniczająco na wykorzystanie materiału w przemyśle z racji złożonego procesu spawania, na który składają się wysokie umiejętności spawacza, znaczne koszty procesu oraz czasochłonność. W SWC rury ze stali 4L7 występuje mikrostruktura bainityczno-ferrytyczna z węglkami, która powstała na skutek szybkiego chłodzenia tej strefy po spawaniu. Mikrostruktura bainityczno-ferrytyczna jest korzystna z punktu widzenia obecności rozdrobnionych listew ferrytu, co podwyższa wytrzymałość i udarność stali w tym obszarze. W SWC rury 3R12 występował rozrost ziarn austenitu, ponadto obserwowano to zjawisko na granicy wtopienia materiału 3R12 i 4L7, co jest charakterystyczne dla procesu walcowania.

Wyniki pomiarów twardości HV1 wykazały, że najwyższym przyrostem twardości charakteryzowała się SWC rury 4L7, co może być spowodowane wymieszaniem się materiału dodatkowego z materiałem spoiny, natomiast najniższą twardość wykazywał obszar SWC rury 3R12.

Na podstawie badań stwierdzono, że złącze spawane jest wolne od niezgodności spawalniczych, a w obrębie spoiny dochodzi do pełnego przetopu. Doczołowe złącze spawane spełnia wymagania dla klasy jakości B wg normy PN-EN ISO 5817.

Uzyskane wyniki badań doczołowego złącza spawanego rury 3R12/4L7 mogą być podstawą do kwalifikowania technologii spawalniczej wg normy PN-EN ISO 15614-1:2008 oraz do projektowania złączy ze stali 3R12/4L7, a także są źródłem informacji dla konstruktorów oraz technologów.

Badania wykonano w ramach Projektu „Badania i rozwój nowoczesnych technologii”, Działanie 1.4 Wsparcie Projektów Celowych, Nr PIOG.01.04.00-24-048/13. Projekt współfinansowany był przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- [1] A. Hernas, T. Wala, S., M. Staszewski: Charakterystyka i dobór stali na przegrzewacze o nadkrytycznych parametrach pary, *Inżynieria Materiałowa*, nr 3 (169), s. 143-151, 2009.
- [2] N. Konieczna, S. Lalik: Badanie złączy spawanych innowacyjnej rury kompozytowej dla energetyki, *Przegląd Spawalnictwa*, nr 7 (vol. 88), s. 5-9, 2016.
- [3] Sandvik 3R12/4L7, "Composite tubes for recovery boilers and other boiler applications", Sandvik Materials Technology, 2012.
- [4] J. Adamski, A. Balcerzyk, S. Lalik: Badania przemysłowe gazoszczelnych ścian rurowych i węzownic ze stali nowej generacji, *Energetyka*, nr 10, s.645-647, 2015.
- [5] P. Jamrozik, M. Sozańska, J. Pasternak: Właściwości mechaniczne złączy spawanych ze stali Sanicro 25 oraz stopu HR6W, *Przegląd Spawalnictwa*, nr 10, s. 39-45, 2013.
- [6] P. Urbańczyk, J. Stania, G. Golański, M. Matusik: Wpływ pelzania na uszkodzenia złącza spawanego rurociągu pary świeżej, *Przegląd Spawalnictwa*, nr 4, s. 23-31, 2014.
- [7] M. Blicharski: Zmiany mikrostruktury w połączeniach spawanych różnoimiennych materiałów stosowanych w energetyce, *Przegląd Spawalnictwa*, nr 3, s. 2-13, 2013.
- [8] Hernas A., Dobrzański J., Pasternak J., Fudali S.: Charakterystyki nowej generacji materiałów dla energetyki, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2015.
- [9] Kazanecki J.: Wytwarzanie rur bez szwu, Uczelniane Wydawnictwa Naukowe – Dydaktyczne, 2003.