

Wykorzystanie niskoenergetycznego procesu CMT do napawania elementów kotłów energetycznych materiałami odpornymi na korozję lub/i erozję z przeznaczeniem do pracy w podwyższonej temperaturze



Mgr inż. Arkadiusz Bolek, mgr inż. Hubert Smorąg – Fabryka Kotłów SEFAKO S.A.

W artykule zaprezentowano zastosowania technologii napawania łukowego z wykorzystaniem niskoenergetycznego procesu CMT (Cold Metal Transfer) na przykładzie wzdłużnego napawania ścian gazoszczelnych oraz obwodowego rur przeznaczonych do pracy w podwyższonych temperaturach z wykorzystaniem stopu Inconel 625. Przedstawiono zakres wykonanych prób, wyniki badań metalograficznych makro- i mikroskopowych oraz właściwości wytrzymałościowe otrzymanych napoin. Wskazano korzyści związane z wykorzystaniem technologii „CMT”. Otrzymane wnioski oraz uzyskanie zatwierdzenia technologii napawania przez Jednostkę Notyfikowaną zgodnie z EN 15614-7, VdTUV Merkblatt 1166 pozwalają na stwierdzenie, że Fabryka Kotłów „Sefako” wdrożyła nowoczesną technologię i posiada umiejętności wytwarzania znanych oraz innowacyjnych powłok ochronnych metodą napawania na elementach kotłów energetycznych.

Wychodząc naprzeciw rosnącemu zapotrzebowaniu na powłoki przeciwdziałające korozji/erozji dla powierzchni elementów kotłów energetycznych pracujących przy udziale agresywnego środowiska oraz wysokiej temperatury, w marcu 2011 roku powstała w Fabryce Kotłów SEFAKO pierwsza w Polsce linia do napawania ścian gazoszczelnych oraz rur przy wykorzystaniu technologii CMT „Cold Metal Transfer”. Proces ten charakteryzuje się niską energią liniową z zachowaniem połączenia metalurgicznego na linii napoina – podłoże. Najważniejszym parametrem, który wpłynął na wybór technologii CMT, był niski jak dla łukowych metod napawania wskaźnik procentowy wymieszania napoiny z materiałem podłoża. Celem dokładnego poznania w/w procesu dokonano szeregu badań procesu napawania z zastosowaniem wielu zmiennych parametrów. W wyniku przeprowadzonych prób dokonano doboru parametrów technologicznych procesu oraz z powodzeniem wdrożono do produkcji napawanie z zastosowaniem materiałów tj. Inconel 625, Inconel 686, G4, 309, 310. Badania zostały wykonane przy współpracy naukowców z Akademią Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Działania badawcze zostały wykonane przy dofinansowaniu z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR). W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań napoin wykonanych z wykorzystaniem stopu Inconel 625.

Wymagania i założenia procesu napawania

W przypadku kotłów do utylizacji odpadów najczęściej wykorzystywanym stopem jest Inconel 625. Z przeprowadzonych własnych analiz na podstawie specyfikacji technicznych zapytań, najczęściej powłoki są nanoszone o grubości nie mniejszej niż 2 mm, choć można również znaleźć o grubości nie mniejszej niż 1 mm. Przedmiotowe powłoki mogą być wykonywane w systemie zarówno jedno-, jak i dwuwarstwowym. Dla jednowarstwowych powłok o grubości powyżej 1 mm konieczne jest zastosowanie nakładania się ściągów w stopniu nie mniejszym niż 30%. Natomiast dla powłok o grubości powyżej 2 mm napawanych w systemie jednowarstwowym konieczne jest zastosowanie nakładania się ściągów powyżej 50%. Powłoki dwuwarstwowe wykonywane są techniką napawania ściągów z zakładką nie mniejszą jak 10%. Obszary połączeń między ściągami jak również miejsca rozpoczęcia i zakończenia napawania, tj. miejsca styku niepokrytego materiału rodzimego z napoiną nie powinny prowadzić do koncentracji naprężeń.

Przejście od niepokrytego materiału rodzimego do napoiny powinno być łagodne (bez karbu stanowiącego koncentrację naprężenia). Aby osiągnąć takie przejście, zwykle jest stosowane napawanie ręczne metodą GTAW (TIG 141). Normy odbiorowe wskazują na odpowiednią jakość napoiny tj. niedozwolone są: pory sięgające do materiału rodzimego (dopuszczalne są tylko pory gazowe o średnicy nie większej niż 1 mm), kratery w końcowych miejscach napawania, podtopienia (podcięcia spawalnicze), pęknięcia gorące, przyklejenia przekraczające 100 cm²/m² powierzchni napoiny. W warstwach ze stopów na osnowie Ni maksymalna zawartość Fe dla napawania automatycznego wynosi 5%, a dla napawania ręcznego 7%, natomiast podczas napawania w warunkach montażu dopuszczalna zawartość Fe wynosi nie więcej niż 7% dla napawania automatycznego, mniej niż 10% dla procesu napawania ręcznego. Zawartość Fe w warstwie napawanej na rurach metodą CMT nie powinna przekraczać 2% na powierzchni napoiny. Zawartość większa niż 3% może wskazywać, że do napawania użyto drutu zawierającego więcej niż 1% Fe. Dodatkowym parametrem dla napoin ze stopu 625 może być twardość, która powinna być nie większa niż 250 HV10. Gdy podłożem jest stal niestopowa, twardość dla SWC nie powinna przekraczać 300 HV10 i 350 HV10, gdy podłożem jest stal niskostopowa.

Metodyka badań

Do badań zastosowano elementy ścian gazoszczelnych oraz rury pojedyncze proste. Do przygotowania elementów próbnych zastosowano rury ze stali w gatunku P235GH, P265GH, 16Mo3 wg PN-EN 10216-2 oraz płaskowniki ze stali S235JR wg PN-EN 10025 i 16Mo3 wg PN-EN 10216-2. Materiały podstawowe do prób zestawiono w tablicy I.

Przed przystąpieniem do procesu napawania płyty ścian i rury pojedyncze zostają poddane procesowi śrutowania zgodnie z normą EN ISO 8501-1. Podstawowa różnica pomiędzy napawaniem rur kotłowych i ścian szczelnych kotłów polega na tym, że rura podczas napawania jest w położeniu poziomym i obraca się wokół własnej osi, a palnik źródła CMT przemieszcza się równoległe do osi rury. Dlatego palnik porusza się względem rury po linii śrubowej, ściany szczelne natomiast podczas napawania są nieruchome i są ustawione w położeniu pionowym, a na specjalnych windach przemieszcza się palnik źródła CMT. Poszczególne ścięgi w procesie napawania rur kotłowych są nanoszone po linii śrubowej na powierzchnię rury w sposób zapewniający równomierne pokrycie nanoszonym materiałem całej powierzchni zewnętrznej rury. W procesie powlekania ścian szczelnych kotłów (wielokrotnych układów rura- płaskownik- rura) ścięgi są nanoszone jednostronnie na powierzchnię ściany (od strony wewnętrznej kotła) równoległe do jej osi, a nie spiralnie tak jak to ma miejsce w przypadku powlekania rur kotłowych. W przypadku napawania ścian szczelnych zaprojektowano i wykonano specjalne ramy mocujące, które zapobiegają deformacji ściany w procesie napawania. Rury zarówno indywidualne, jak i w ścianach są podczas napawania chłodzone od środka wodą. W tym celu przewidziano specjalne systemy chłodzenia. Do napawania zastosowano materiały, których składy chemiczne oraz właściwości mechaniczne zestawiono w tablicy II.

Tablica I. Skład chemiczny oraz własności mechaniczne materiałów podstawowych

Rodzaj wyrobu, Gatunek stali	Rura P235GH	Rura P265GH	Rura 16Mo3	Płaskownik S235JR	Płaskownik 16Mo3	
Zawartość pierwiastków w % mas.	C	≤0,16	≤0,20	≤0,12÷0,20	0,17	0,12÷0,20
	Si	≤0,35	≤0,40	≤0,35	-	≤0,35
	Mn	≤1,20	≤1,40	0,40÷0,90	max 1,40	0,40÷0,90
	P max	0,025	0,025	0,025	0,035	0,025
	S max	0,020	0,020	0,020	0,035	0,010
	N max	-	-	-	0,012	0,012
	Cr	≤0,30	≤0,30	≤0,30	-	≤0,30
	Mo	≤0,08	≤0,08	≤0,08	-	0,25÷0,35
	Ni	≤0,30	≤0,30	0,25÷0,35	-	≤0,30
	Al _{całk.}	≥0,020	≥0,020	≤0,040	-	-
	Cu	≤0,30	≤0,30	≤0,30	max 0,55	≤0,30
	Nb	≤0,010	≤0,010	-	-	≤0,02
	V	≤0,02	≤0,02	-	-	≤0,02
	Ti max	0,04	0,04	-	-	0,03
	Cr+Cu+Mo+Ni	≤0,70	≤0,70	-	-	≤0,70
Własności mechaniczne	Re _{0,2} [MPa]	235	265	280	235	275
	Rm[MPa]	360÷500	410÷570	450÷600	360÷510	440÷590
	A[%]	23÷25	21÷23	20÷22	26	22

Tablica II. Składy chemiczne oraz własności mechaniczne materiałów do napawania dostępne w ofercie Fabryki Kociołów Sefako S.A.*

Rodzaj materiału napoiwy	G4	309	310	Inconel 625	Inconel 686	
Zawartość pierwiastków w % mas.	C	0,13	0,03	0,08÷0,15	0,125	0,01
	Si	0,55	0,65÷1,2	2,0	0,40	0,08
	Mn	0,60	1,0÷2,5	1,0÷2,5	0,40	0,75
	Cr	6,4	22÷25	24÷27	21÷23	19÷23
	Ni	-	11÷14	18÷22	reszta	reszta
	Mo	3,2	0,3	0,3	8,0÷10	15÷17
	Cu	<0,15	0,3	0,3	-	-
	Nb	-	-	-	3,2÷3,8	-
	W	-	-	-	-	3,0÷4,4
	Ti	-	-	-	0,40	0,02÷0,25
	Fe	reszta	reszta	reszta	<1,0	<1,0
Własności mechaniczne	Re _{0,1} [MPa]	-	-	-	415	379
	Re _{0,2} [MPa]	-	320	350	-	-
	Re _{1,0} [MPa]	-	-	-	445	-
	Rm[MPa]	-	510	550	830	758
	A5[%]	-	25	20	35	60
	Twardość [HRC]	38÷42	-	-	-	-
Temperatura i warunki pracy	[°C]	550(a)	(b)	1200(c)	450(d)	(e)
Uwagi	a- odporność na erozję do temperatury 550°C. Brak możliwości gięcia elementów napawanych spoiwem typu „G4”. Możliwość wykonania powłok o grubości powyżej 2 mm					
	b- odporność na korozję w zakresie temperatur: -196÷350 [°C]. Elementy rur oraz ścian szczelnych pokrytych stalą typu „309” wykazują możliwości gięcia. Możliwość wykonania powłok o grubości powyżej 2 mm					

Tablica II. cd. Składy chemiczne oraz własności mechaniczne materiałów do napawania dostępne w ofercie Fabryki Kotłów Sefako S.A.*

Uwagi	c- żaroodporność, odporność na korozję wysokotemperaturową do 1200 [°C]. Elementy rur oraz ścian szczelnych pokrytych stalą typu „310” wykazują możliwości gięcia. Możliwość wykonania powłok o grubości powyżej 2 mm
	d- warstwa stosowana w kotłach do utylizacji odpadów wykazująca odporność na korozję. Sugerowana temperatura pracy elementów od strony czynnika chłodzącego: max 450 [°C]. Zastosowanie: komory paleniska, ścian działowych, grodziowych, przegrzewaczy pary ściany szczelne 1,2,3-go ciągu, przyrztwowych na odgęcia okien -włazowych, -palników, -rewizyjnych, rury przegrzewaczy typu węzownice, panelowe
	e- znakomita odporność korozyjna w podwyższonej temperaturze zarówno w atmosferze redukującej jak również utleniającej, w tym odporność na korozję wżerową i szczelinową w obecności kwasu siarkowego, solnego, chlorowego

* PN-EN ISO 18274 Materiały dodatkowe do spawania -- Druty i taśmy elektrodowe, druty i pręty do spawania niklu i stopów niklu – Klasyfikacja. PN-EN ISO 14343 Materiały dodatkowe do spawania, druty elektrodowe, taśmy elektrodowe druty i pręty do spawania stali nierdzewnych i żaroodpornych – Klasyfikacja. EN 14700 Materiały dodatkowe do spawania -- Materiały dodatkowe do napawania utwardzającego

Zastosowana technologia napawania

Technologia napawania CMT jest znaną techniką napawania łukowego opracowaną w 2002 r. przez austriacką firmę Fronius. Jest to metoda napawania z impulsowym podawaniem drutu, w której znacznie obniżono temperaturę łuku w porównaniu z tradycyjnym procesem napawania łukiem zwarciowym. W metodzie CMT drut jest przesuwany w kierunku podłoża do momentu pojawienia się zwarcia. Następnie drut jest odciągany. Kiedy zwarcie zaniknie, drut porusza się ponownie w kierunku podłoża i proces rozpoczyna się od początku (rys.1). Charakterystyczną cechą metody CMT jest to, że przenoszenie metalu odbywa się przy małym prądzie, co sprawia, że ilość ciepła wydzielonego jest mała, a przez to niewielka jest głębokość przetopienia podłoża i ilość żelaza dostająca się do powłoki, podczas gdy tradycyjne łukowe metody napawania charakteryzują się dużym zwarciem prądu, a zatem dużą ilością wytwarzanego ciepła i głębokim przetopieniem podłoża. Na rysunku 1 pokazano kolejne stadia napawania techniką CMT.



Rys.1. Charakterystyka przebiegu procesu spawania metodą CMT „Cold Metal Transfer”

W ramach zaplanowanych działań badawczych wykonano szereg prób testowych zarówno na rurach, jak i na ścianach szczelnych przy użyciu technologii CMT, podczas których dokonywano doboru i modyfikacji linii synergicznych oraz ustalen parametrów wejściowych celem uzyskania stabilnego procesu napawania. W trakcie trwania procesu napawania na bieżąco dokonywano podstawowych pomiarów grubości powłoki oraz zawartości żelaza Fe na powierzchni napoiny. Dalsze działania były ukierunkowane na wypracowanie optymalnej kombinacji parametrów wejściowych w celu poprawy jakości napoin. Wykonano szereg próbek, z których pobrano materiał badawczy: dokonano oznaczenia próbek. Badania nieniszczące obejmowały m.in. kontrolę wizualną, pęknięć powierzchniowych i porowatości (karby, otwarte pory, czy też pęknięcia na gorąco) na powierzchni napawanych powłok, jak również badania penetracyjne i badania ultradźwiękowe. W zakres badań niszczących wchodziły

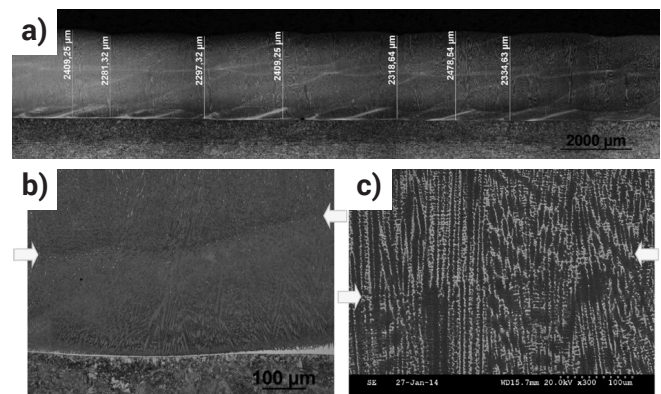
badania struktury oraz składu chemicznego, w tym ilości Fe przechodzącego z podłoża do napoiny, jak również właściwości mechanicznych.

Wyniki badań

Przeprowadzone serie prób i badania dotyczące napawania rur kotłowych materiałem Inconel 625 potwierdziły, że optymalnym rozwiązaniem jest zastosowanie układu dwuwarstwowego. Zaletą takiego rozwiązania jest uzyskiwanie znacznie gładziej powierzchni wykonywanej napoiny, która jest pozbawiona wyraźnych karbów na przejściach między poszczególnymi ściegami. Ze strony spawalniczej stwierdza się, że napawanie w układzie dwuwarstwowym jest procesem



Rys.2. Fragment rury napawanej w układzie dwuwarstwowym Inconelem 625 z użyciem technologii CMT



Rys.3. Typowy obrazy struktury powłoki ze stopu Inconel 625 naniesionej na rurę 16Mo3; a – obraz makrostruktury powłoki (na granicy powłoka/rura) pokazujący grubość powłoki, stopień wzajemnego zachodzenia poszczególnych ściegów, b - obraz mikrostruktury przedstawiający powiększony fragment granicy powłoka/rura oraz granicy dwóch ściegów (zaznaczony strzałkami), c- obraz skaningowy granicy dwóch ściegów (zaznaczony strzałkami)

znacznie stabilniejszym z minimalną ilością wad typu pory oraz krateru. Osiągnięto satysfakcjonującą wartość średnią grubości napoin. Zawartość żelaza na powierzchni wszystkich wykonanych próbkach zawiera się poniżej 2 % mas.

Badania mikroskopowe (Rys. 3) prowadzone z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej (SM) oraz elektronowej skaningowej (SEM) wykazały dobrą jakość napoin. W granicach wtopienia (powłoka/rura oraz granicy dwóch ściegów) nie obserwowano wad w postaci porów, nieciągłości, czy też braku przetopienia. Obserwowano dziedziczenie orientacji kryształów utworzonych w pierwszej warstwie przez warstwę drugą (Rys. 3c).

W szczegółowych badaniach struktury i składu chemicznego, oprócz mikroskopu skaningowego (SEM) wykorzystano również mikroanalizę rentgenowską metodami WDS i EDS umożliwiającą jakościową i ilościową analizę chemiczną, dla określenia składu powłok i segregacji pierwiastków (analiza punktowa liniowa i powierzchniowa - mapy rozmieszczenia poszczególnych pierwiastków).

Powłoki Ochronne – Fakty

Wystartowaliśmy w kwietniu 2012, do dzisiaj w Sefako z wykorzystaniem powłok ochronnych zrealizowano 8 projektów budowy kotłów do nowych spalarni odpadów w Polsce i Europie. Możliwości produkcyjne napawania pozwalają na wykonywanie kompletnych instalacji kotłów do utylizacji odpadów na warsztacie Sefako. Posiadamy 2 instalacje do napawania ścian szczelnych, komór wyposażone w 4 głowice do napawania, każda w technologii CMT (Cold Metal Transfer)/PULS/STANDARD, stanowisko testowe do napawania obwodowego rur oraz w nowe stanowisko do rur o długości do 8mb.

Podsumowanie

Dzięki dofinansowaniu uzyskanemu z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) oraz ścisłej współpracy z Akademią Górniczo Hutniczą w Krakowie, wdrożono w Fabryce Kotłów „Sefako” nową w skali kraju, innowacyjną technologię. Stworzono tym samym możliwość powlekania w SEFAKO S.A. elementów urządzeń energetycznych różnymi stalami dostosowanymi do wymagań i potrzeb potencjalnych odbiorców. Usprawniono proces wytwarzania kotłów, poprzez częściowe wyeliminowanie dostaw zewnętrznych napawanych rur oraz ścian szczelnych dla kotłów energetycznych. Zdobyte doświadczenie zespołu „Sefako” oraz AGH przy realizacji wspólnych prac badawczych pozwoliło poszerzyć ofertę firmy o powłoki ze stali ferrytycznych, austenitycznych oraz niklowo-chromowo-molibdenowych. Należy podkreślić, iż proponowana nowa technologia pozwala na precyzyjną regulację ilości ciepła przekazywanego do podłoża, co trudne jest do uzyskania przy stosowaniu w procesie napawania powłok tradycyjnych procesów spawalniczych, np. metod MIG/MAG. W porównaniu do metod MIG/MAG technika CMT wykazuje wiele cech szczególnych

tj.: kontrola łuku spawalniczego, która jest bardzo precyzyjna; powierzchnia napoiny jest praktycznie wolna od kropli i rozprysków; łuk spawalniczy jest bardzo stabilny; mała ilość ciepła przekazywanego do podłoża powoduje, że zniekształcenie napawanych materiałów jest mniejsze o 45% w porównaniu do technik konwencjonalnych; dzięki kontroli strefy wpływu ciepła, zmniejszenie właściwości mechanicznych materiału podłoża jest małe; ilość zużytej energii w porównaniu do MIG/MAG jest znacznie mniejsza. Na dzień dzisiejszy Fabryka Kotłów Sefako planuje dalsze prace badawczo wdrożeniowe związane z przemysłowym procesem napawania.

„Niskoenergetyczne napawanie stalami odpornymi na korozję i erozję powierzchni elementów kotłów energetycznych opalanych węglem”

Projekt współfinansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach drugiej edycji Programu INNOTECH



„Powłoki z nadstopów niklu napawane metodą CMT na rury i ściany szczelne kotłów energetycznych do spalania odpadów”

Projekt współfinansowany ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach pierwszej edycji Programu Badań Stosowanych



Literatura

- [1] Materiały firmowe Fabryki Kotłów SEFAKO.
- [2] S. A. David, J. A. Siefert, J. N. DuPont, J. P. Shingledecker "Weldability and weld performance of candidate nickel base superalloys for advanced ultrasupercritical fossil power plants part I: fundamentals". Science and Technology of Welding and Joining vol.20(7) s. 532, 2015.
- [3] M. Grzybicki., J. Jakubowski.: Badania porównawcze spawania blach ze stali karoseryjnej metodami CMT oraz MIG/MAG. Przegląd spawalnictwa. 10 (2009) str. 32-36.
- [4] C. G. Pickin, S. W. Williams i M. Lunt: Characterization of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding. Journal of Materials Processing Technology, 211 (2011) s. 496-502.
- [5] J. Bruckner: Metoda CMT - rewolucja w technologii spawania. Przegląd Spawalnictwa, 7-8 (2009) s. 24-27.

FABRYKA KOTŁÓW SEFAKO S.A.
ul. Przemysłowa 9 SĘDZISZÓW
tel. (+48 041) 38 11 073
fax (+48 041 38 11 110)

sefako

www.sefako.com.pl