

Sposób łączenia rur kompozytowych przez spawanie

Przedmiotem wynalazku jest sposób łączenia rur kompozytowych przez spawanie, przeznaczonych do wytwarzania części instalacji przemysłowych, w tym w energetyce cieplnej.

W zastosowaniach przemysłowych z rur kompozytowych wykonuje się części instalacji pracujące w środowisku agresywnym między innymi węzownice przegrzewaczy pary w kotłach, elementy przesyłowe, chłodnice gazu, a także ściany szczelne w kotłach grzewczych sodowych, kotłach parowych, kotłach spalających biomasę, elementy kotła odzysknicowego, i inne.

Rury powinny spełniać określone normami parametry techniczne ze względu na ekstremalnie wysokie temperatury oraz ciśnienie w środowisku w którym mają zastosowanie. Wymagania wytrzymałości na pełzanie i zmęczenie, żaroodporność w środowisku spalin i odporność na utlenianie, odpowiednią ciągliwość oraz stabilność mikrostruktury podczas długotrwałej eksploatacji powinny spełniać zarówno materiały użyte do wykonania części w instalacji, jak i złącza spawane.

W warunkach pracy urządzeń energetyki cieplnej bezpośredni kontakt z medium wymaga odporności korozyjnej oraz niskiej rozszerzalności cieplnej. Natomiast po stronie zewnętrznej wymagana jest odporność na odkształcenia plastyczne.

Wytwarzanie np. ścian szczelnych polega na połączeniu elementów płaskownik-rur-płaskownik w tzw. panele. Wymagane jest również łączenie końców rur w ścianach szczelnych, ciągach rur przesyłowych, w tym podczas wymiany oraz naprawy, i podobnych.

Rura kompozytowa składa się z osadzonych współśrodkowo dwóch rur, wykonanych z różnych gatunków materiałów np. dwóch rodzajów stali, połączonych przez walcowanie. Rury o takiej konstrukcji mają zastosowanie w warunkach, gdzie różne są oddziaływania zewnętrzne oraz wewnętrzne i wymagają właściwości materiałów, które nie mogą być spełnione przez jeden materiał.

Znane jest łączenie rur kompozytowych z zastosowaniem spawania łukowego metodą MIG, TIG MMA. W zestawionych i wstępnie połączonych rurach, których powierzchnie ponadto oczyszczono, warstwę wewnętrzną ze stali niestopowej z rowkiem Y spawa się łukowo z zastosowaniem drutu proszkowego. Natomiast warstwę zewnętrzną z rowkiem w kształcie U, spawa się łukowo z zastosowaniem odpowiedniego spoiwa

z drutu proszkowego. Spoiny z pełnym przetopem wytwarza się przez ułożenie kilku ściegów.

Z opisu wynalazku JPH11315973A znane jest łączenie przez spawanie rur ze stali nierdzewnej ferrytycznej i stali austenitycznej z wykorzystaniem materiału dodatkowego, którego skład chemiczny jest zbliżony do składu spawanych rur.

Natomiast z opisu wynalazku JPS59218281A znane jest spawanie rur podwójnych z rurą wewnętrzną i zewnętrzną, wykonanych z austenitycznej stali nierdzewnej, przy czym rura zewnętrzna jest wykonana z austenitycznej stali nierdzewnej o zawartości co najmniej 25%Cr [25Cr-20Ni(SUS310)]. Pierwsza warstwa rury wewnętrznej jest spawana metodą TIG z topnikiem metalicznym o podobnym składzie a druga i kolejne warstwy są spawane łukowo elektrodą otuloną, tworząc spoinę wewnętrznych części rury. Warstwa odpowiadająca zewnętrznej rurze jest spawana materiałem spawalniczym o zawartości Cr wyższej o 1 do 5% wag. niż zawiera materiał tej zewnętrznej rury. Spawanie odbywa się metodą TIG, a azot (N₂) miesza się z gazem osłonowym na etapie spawania, ekwiwalentnie do zawartości Ni, który ma wpływ na ograniczenie wytrącania ferrytu delta (δ -ferrytu).

Z opisu patentu CN107252977B znane jest jednostronne spawanie płyt kompozytowych lub rur kompozytowych ze stali nierdzewnej, prowadzone za pomocą uchwytu spawalniczego MIG / MAG oraz lasera. Warstwę podstawową (wewnętrzną) rury kompozytowej spawa się łukowo elektrodą topliwą w osłonie gazu obojętnego (MIG) lub w osłonie gazu aktywnego (MAG). Natomiast warstwę powłokową zewnętrzną spawa się laserowo.

Łączenie rur kompozytowych wykonanych z tytanu z pokryciem ze stali niestopowej (węglowej) znane jest z opisu patentu CN106425104B. Powierzchnie rur przeznaczone do spawania, po obróbce wstępnej i oczyszczeniu, zestawia się z utworzeniem rowka, a następnie spawa laserowo dolne części tych powierzchni. Na tak utworzone dno nakłada się pastę lub proszek metaliczny w celu utworzenia warstwy przejściowej, i dalej prowadzi spawanie łukowe, w tym warstwy pokrycia.

Z opisu zgłoszonego wynalazku CN110773890A znany jest sposób łączenia rur kompozytowych, w którym spawane powierzchnie rozdziela się dwoma warstwami przejściowymi utworzonymi odpowiednio na każdej z nich.

Sposób łączenia rur kompozytowych przez spawanie, według wynalazku, w którym w łączonych obwodowo rurach kompozytowych, po etapie przygotowania, zestawia się i szczepia współosiowo nieukosowane powierzchnie warstwy wewnętrznej i zewnętrznej, po czym spawa laserowo złączyć warstw wewnętrznych rur, a następnie łączy ich

warstwy zewnętrzne. Istotnym jest, że złącze warstw zewnętrznych rur wykonuje się przez napawanie metodą hybrydową laser-łuk elektryczny z prędkością co najmniej 0,3 m/min w jednym przejściu, a do obszaru złącza tych warstw zewnętrznych wprowadza się energię cieplną wytworzoną przez łuk elektryczny i laser, tak, że linie odwzorowujące ruch lasera i łuku elektrycznego pokrywają jego powierzchnię w zakresie od 50% do 99%.

Złącze warstw wewnętrznych rur spawa się wysokoenergetyczną wiązką laserową o długości fali 930 nm -1064 nm, korzystnie rozogniskowaną, ustawioną pod kątem α w zakresie $0+3^\circ$ do styku łączonych warstw oraz z prędkością co najmniej 0,8 m/min.

Powierzchnie warstwy wewnętrznej i zewnętrznej rur zestawia się ze szczeliną s od 0,01 do 0,2 mm.

Sposób łączenia rur kompozytowych według wynalazku prowadzi się z dużą prędkością spawania i przy znaczącym ograniczeniu ilości ciepła wprowadzanego do obszaru złącza, co powoduje mniejsze deformacje i odkształcenia konstrukcji rur kompozytowych. Ponadto podczas etapu przygotowawczego zmniejsza się ilość operacji przez ograniczenie pracochłonnej obróbki mechanicznej.

Sposób spawania według wynalazku zilustrowano przykładowym wykonaniem na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia sposób przygotowania złącza rur kompozytowych do spawania, fig. 2 przedstawia schematycznie łączenie warstw wewnętrznych, fig. 3 przedstawia schematycznie łączenie warstw zewnętrznych, fig. 4 przedstawia układ urządzeń do wykonywania złącza, fig. 5 odwzorowuje ruch głowicy w czasie wprowadzania energii cieplnej do obszaru złącza warstw, fot. 1 przedstawia złącze rur kompozytowych, fot.2 przedstawia makrostrukturę złącza.

Sposób łączenia rur kompozytowych polega na utworzeniu obwodowego złącza przez spawanie kolejno warstw wewnętrznych **1**, a następnie zewnętrznych **2**. Etap przygotowania rur do spawania obejmuje odpowiednią obróbkę mechaniczną np. frezowanie, toczenie, cięcie mechaniczne lub laserowe, a z powierzchni zewnętrznej każdej z rur usuwa się warstwę materiału na odcinku przy krawędziowym i oczyszcza z zanieczyszczeń na szerokości $b=2+3$ mm. Następnie rury zestawia się szczeliną od 0,01 do 0,2 mm, i szczepia współosiowo nieukosowane powierzchnie warstwy wewnętrznej **1** i zewnętrznej **2**, jak pokazano na fig.1. W czasie tworzenia złącza rury kompozytowe umieszczone są w obrotniku, niepokazanym na rysunku.

Sposób zostanie przedstawiony na przykładach łączenia rur kompozytowych wytworzonych z dwóch rodzajów materiałów, w tym o strukturze austenitycznej oraz ferrytyczno-perlitycznej.

Złącze **1a** warstw wewnętrznych **1** rur spawa się laserem **3** dużej mocy, a parametry wysokoenergetycznej wiązki laserowej dobrano tak, aby uzyskać w jednym przejściu złącze (spoinę) doczołowe z pełnym przetopem, o optymalnym kształcie i jakości. Dla procesu spawania ustala się ognisko o najmniejszej średnicy, co z kolei umożliwia uzyskanie dużej gęstości mocy oraz prędkości i zminimalizowanej gęstości energii liniowej. Dla uzyskania odpowiedniego kształtu i głębokości spoiny ustala się położenie ogniska wiązki laserowej **3a**, ponieważ jego położenie względem powierzchni spawanych wpływa na optymalizację tych parametrów. Dla spawania warstw wewnętrznych **1** rur kompozytowych moc lasera dobiera się odpowiednio do grubości spawanych elementów, a im grubszy materiał, tym większa jest wymagana moc do pełnego przetopienia. Z kolei promieniowanie o większej mocy, przy niezmiennej jakości wiązki, umożliwia uzyskanie większej prędkości spawania, która ma wpływ na cykl cieplny tego procesu. W sposobie według wynalazku złącze **1a** spawa się wysokoenergetyczną wiązką laserową **3a** o długości fali 930 nm -1064 nm, korzystnie rozogniskowaną do średnicy ogniska, ustawioną pod kątem α w zakresie $0+3^\circ$ do styku łączonych warstw oraz z prędkością co najmniej 0,9 m/min. Proces spawania laserowego prowadzi się bez – lub z osłoną gazową, która chroni strefę spoiny przed utlenianiem i zapewnia kontrolę obłoku plazmy. Przy wyborze osłony gazowej uwzględnia się skłonność do tworzenia się obłoku plazmy, oddziaływanie metalurgiczne z materiałem spawanym oraz skuteczność osłony strefy spoiny przed wpływem czynników atmosferycznych. Przydatność określonego gazu zależy m. innymi od zastosowanego lasera (CO₂, YAG), wymaganej mocy wiązki promieniowania laserowego, głębokości wtopienia, jakości spoiny. Jako gaz osłonowy stosuje się argon (Ar), a strumień objętości gazu osłonowego wynosi do 8 l/min.

Kolejnym etapem procesu spawania złącza jest uzupełnienie warstw zewnętrznych **2** rur kompozytowych przez napawanie powłoki odpowiadającej warstwie materiału rodzimego, na szerokości **b** od krawędzi, skąd warstwa tego materiału została usunięta mechanicznie.

W łączonych rurach złącze **2a** warstw zewnętrznych **2** wykonuje się przez napawanie metodą hybrydową laser-łuk elektryczny. Spawanie złącza prowadzono za pomocą lasera dyskowego oraz metody MIG/MAG w celu uzyskania w jednym przejściu warstwy napawanej o grubości od 1,8 do 3 mm. Proces spawania zrobotyzowanego laser+MAG jest określany również jako HLAW (HybridElectric Arc Welding).

W procesie spawania wiązka laserowa **3a** może poprzedzać łuk elektryczny **4** w odniesieniu do kierunku spawania lub na odwrót. Odległość „w” pomiędzy końcówką drutu elektrodowego **5** a wiązką promienia laserowego **3a** wynosi nie więcej niż 4mm.

Istotnym czynnikiem dla stabilności procesu i jakości uzyskiwanych złączy, oprócz parametrów technologicznych, jest dobór kątów ustawienia głowicy hybrydowej względem łączonych warstw zewnętrznych rur kompozytowych. Proces napawania hybrydowego laser + MAG może być prowadzony z wiązką lasera padającą prostopadle do osi styku łączonych rur.

W zależności od warunków spawania oś drutu elektrodowego **5** w uchwycie MIG/MAG ustawia się pod kątem β w zakresie 20° do 70° do powierzchni rur. Natomiast oś uchwytu z elektrodą MIG/MAG ustawia się pod kątem 25° w stosunku do osi wiązki laserowej **3**. Parametry wiązki laserowej **3** i łuku elektrycznego **4** dobrane są tak, aby uzyskać w jednym przejściu napoinę o odpowiednich wymiarach geometrycznych z prędkością napawania co najmniej 0,3 m/min.

Do obszaru złącza warstw zewnętrznych **2** rur wprowadza się energię cieplną **Q** wytworzoną przez łuk elektryczny i laser, tak, że linie odwzorowujące ruch lasera i łuku elektrycznego pokrywają jego powierzchnię w zakresie od 50% do 99%. W związku z tym proces napawania prowadzi się techniką napawania np. zakosami, sinusoidą i podobnymi (rys. 5).

Napawanie prowadzi się w gazie osłonowym i stosuje mieszaninę argonu i dwutlenku węgla, co zapewnia prowadzenie stabilnego procesu napawania hybrydowego i poprawne uformowanie napoiny.

Przykład 1

Próbka D1 poddana badaniom – to rura kompozytowa Sandvik 3R12/4L7 o średnicy \varnothing 63,5 x 6,53 mm i długości 140 mm, gdzie warstwa wewnętrzna ma grubość 4,71 mm a warstwa zewnętrzna 1,82 mm.

Warstwa zewnętrzna 3R12 oznacza stal austenityczną (X2CrNi18-10, 1.4306). Stal 3R12 zapewnia wysoką odporność korozyjną z uwagi na zawartość chromu i niklu (18-10). Warstwa wewnętrzna 4L7 oznacza stal P265GH, tj. stal kotłową żarowytrzymałą.

Złącze spawane warstw wewnętrznych – 4L7 (P265GH) zostało wykonane laserem dyskowym, wiązką laserową o średnicy ogniska 0,6 mm i długości fali 1064 nm;

Warstwa zewnętrzna (cladding) 3R12 (X2CrNi18-10) została napawana hybrydowo.

Parametry procesu spawania laserem dyskowym.

Materiał	Nr próbki	P [W]	Vs [m/min]	f [mm]	Gaz osłonowy
3R12/4L7	D1	4500	0,9	0	-

gdzie: P [W]- moc wiązki lasera, Vs [m/min] – prędkość spawania; f[mm] – położenie ogniska wiązki laserowej;

Parametry procesu napawania hybrydowego

Spawanie złącza prowadzono za pomocą lasera dyskowego oraz metody MAG.

Proces napawania polegał na uzupełnieniu warstwy zewnętrznej.

Nr próbki	P [W]	V _n [m/min]	V _d [m/min]	I [A]	U [V]	Kor. U[V]	f [mm]	Q [kJ/cm]
D1	500	0,3	5	150	18	3	0	9,6

moc wiązki lasera - P [W]; prędkość spawania - Vs [m/min]; prędkość podawania drutu - Vd [m/min]; natężenie prądu napawania - I [A]; napięcie łuku - U [V]; korekta napięcia łuku (nastawa źródła łukowego) - Kor. V [V]; położenie ogniska względem powierzchni spawanych rur - f [mm], ilość wprowadzonego ciepła – Q[kJ/mm];

Rury kompozytowe zestawiono ze szczeliną $s=0,01$ mm, a następnie spawano laserowo złącze warstw wewnętrznych z prędkością 0,9 m/min, przy czym położenie ogniska wiązki laserowej ustawiono na powierzchni rury ($f=0$).

Proces napawania warstw zewnętrznych prowadzono prędkością 0,3 m/min, ściegami (liniami) zakosowymi o długości skoku 1,5 mm oraz amplitudzie 6 mm, przy czym stopień pokrycia powierzchni wynosił 99%.

Zastosowano następujące ustawienia: położenie ogniska względem powierzchni spawanych rur $f=0$, kąt pochylenia uchwytu MAG w stosunku do powierzchni napawanej wynosił 25° . o długości fali 930 nm -1064 nm

Jako gaz osłonowy w metodzie MAG zastosowano mieszankę M12 (Inoxline C2, PN-EN ISO 14175- M12 – ArC – 2,5). Jako spoiwo stosowano drut spawalniczy gatunku LINCOLN MIG 308LSi (PN-EN ISO 14343-A: G 19 9 LSi).

Złącze, cechuje równomierny nadlew, gładkie lico, bez rozprysków z pełnym przetopem na całej długości złącza. Badania metalograficzne makro i mikroskopowe nie wykazały niezgodności spawalniczych w złączu.

Przykład 2

Próbka D2 poddana badaniom to rura kompozytowa Sanicro 38/4L7 o średnicy \varnothing 63,5 x 6,53 mm i długości 140 mm, gdzie warstwa wewnętrzna ma grubość 4,71 mm a warstwa zewnętrzna 1,82 mm.

Oznaczenie warstwy zewnętrznej 38 w rurze 38/4L7 oznacza stop niklu 825 (2.4858). Stop jest stabilizowany tytanem z dodatkiem miedzi i molibdenu.

Oznaczenie warstwy wewnętrznej 4L7 oznacza stal P265GH – tj. stal kotłowa żarowytrzymała, przeznaczona do pracy w podwyższonych temperaturach. Warstwa wewnętrzna złącza spawanego rury została wykonana laserem dyskowym, wiązką laserową o średnicy ogniska 0,6 mm i długości fali 1064 nm; warstwa zewnętrzna (cladding) została napawana metodą hybrydową.

Parametry procesu spawania laserem dyskowym

Materiał	Nr próbki	P [W]	Vs[m/min]	f [mm]	Gaz osłonowy
38/4L7	D2	4500	0,9	0	-

gdzie: P [W]- moc wiązki lasera, Vs [m/min] – prędkość spawania; f[mm] – położenie ogniska wiązki laserowej;

Parametry procesu napawania hybrydowego

Proces spawania złącza prowadzono za pomocą lasera dyskowego oraz metody MAG.

Proces napawania polegał na uzupełnieniu warstwy zewnętrznej.

Nr próbki	P [W]	V _n [m/min]	V _d [m/min]	I [A]	U [V]	Kor. U[V]	f [mm]	Q [kJ/cm]
D2	500	0,4	8,5	120	20	3	0	6,4

gdzie: moc wiązki lasera - P [W]; prędkość spawania - Vs [m/min]; prędkość podawania drutu - Vd [m/min]; natężenie prądu napawania - I [A]; napięcie łuku - U [V]; korekta napięcia łuku (nastawa źródła łukowego) - Kor. U [V]; położenie ogniska względem powierzchni spawanych rur - f [mm], ilość wprowadzonego ciepła – Q[kJ/mm];

Rury kompozytowe zestawiono ze szczeliną 0,01 mm, a następnie spawano laserowo złącze warstw wewnętrznych z prędkością 0,9 m/min, przy czym położenie ogniska wiązki laserowej ustawiono na powierzchni rury (f=0).

Proces napawania warstw zewnętrznych prowadzono ściegami (liniami) zakosowymi o długości skoku 1,5 mm oraz amplitudzie 6 mm, przy czym stopień pokrycia powierzchni

wynosił 96%. Proces prowadzono w konfiguracji z wiązką laserową poprzedzającą łuk elektryczny.

Zastosowano następujące ustawienia: odległość „w” pomiędzy końcówką drutu elektrodowego 5 a wiązką promienia laserowego 3a równą 3 mm. Kąt α ustawienia wiązki laserowej do styku łączonych warstw - 0° , położenie ogniska wiązki laserowej ustawiono na powierzchni rury ($f=0$), kąt pochylenia uchwytu MAG w stosunku do powierzchni napawanej wynosił 25° .

Proces prowadzono w mieszance: Ar – 87,5%, CO₂ – 2,5%, a jako spoiwo wykorzystano drut OKAutrod NiCrMo-3(PN-EN ISO 18274: SNi 6625 – NiCr22Mo9Nb).

Złącze cechuje równomierny nadlew, gładkie lico, bez rozprysków z pełnym przetopem na całej długości złącza. Badania makroskopowe nie wykazały wad złącza.

DYREKTOR

dr inż. Adam Pietras

