

Sposób spawania warstw z materiałów nierdzewnych rur dwuwarstwowych

Przedmiotem wynalazku jest sposób spawania warstw z materiałów nierdzewnych rur dwuwarstwowych, przeznaczony do stosowania podczas obwodowego łączenia w celu wytworzenia lub naprawy ścian szczelnych, zwłaszcza kotła sodowego.

Rura dwuwarstwowa składa się z osadzonych współśrodkowo dwóch rur, wykonanych przez odlewanie z różnych materiałów np. stali, połączonych przez wciskanie na gorąco, a następnie walcowanych na zimno.

Rury o takiej konstrukcji mają zastosowanie w warunkach, gdzie różne są oddziaływania czynników zewnętrznych oraz wewnętrznych i wymagane są takie właściwości, które nie mogą być spełnione przez jeden materiał.

Znane jest stosowanie rur dwuwarstwowych w przemyśle energetycznym m.in. do produkcji ścian szczelnych stosowanych w kotłach parowych, kotłach spalających biomasę. W innych zastosowaniach np. w przemyśle celulozowo-papierniczym - z rur dwuwarstwowych wykonuje się elementy instalacji kotła sodowego, który stanowi podstawową część systemu regeneracji chemikaliów i wytwarzania energii w instalacji do produkcji masy włóknistej. W kotle sodowym spala się składniki organiczne zawarte w zatężonym ługu z procesu roztwarzania drewna. Natomiast energia powstająca w trakcie spalania ługów wykorzystywana jest do produkcji pary i energii elektrycznej.

Ściany szczelne mają budowę panelową złożoną z połączonych elementów płaskownik-rura-płaskownik, a do wykonania ścian kotła sodowego do zastosowań w przemyśle celulozowo-papierniczym stosuje się rury dwuwarstwowe. Podczas wymiany oraz naprawy instalacji konieczne jest łączenie końców rur w ścianach szczelnych, a także ciągach rur przesyłowych.

Niezbędne jest więc stosowanie sposobu spawania materiałów nierdzewnych rur dwuwarstwowych pozwalającego na uzyskanie takiego samego poziomu właściwości mechanicznych w strefie naprawy.

W warunkach pracy tych urządzeń, oprócz odpowiedniej odporności wytrzymałościowej, wymagania stawiane poszczególnym elementom konstrukcji nie są takie same. Bezpośredni kontakt z medium wymaga niskiej rozszerzalności cieplnej, a po stronie zewnętrznej wymagania dotyczą odporności korozyjnej. Z tego względu na powierzchnie wymagające takiej odporności stosuje się stale i stopy odporne na korozję austenityczną, zawierające co najmniej 10,5% chromu. Wynikowo odporność korozyjna zależy od stężenia chromu w stalach i stopach oraz tworzenia się ochronnej warstwy tlenku chromu Cr_2O_3 , a także

mikrostruktury na co ma wpływ zawartość pierwiastków stopowych oraz warunki eksploatacji.

Odpowiednio problem dotyczy również połączeń spawanych w konstrukcjach ze stali nierdzewnych, a których wytworzenie wymaga nagrzewania wieloskładnikowego materiału skoncentrowanym strumieniem ciepła. Ponadto spoiny w warunkach obciążeń dynamicznych stają się koncentratorami naprężeń i miejscem powstawania pęknięć, a w następstwie również korozji naprężeniowej, mimo, że w typowych warunkach pracy nie stanowią problemu eksploatacyjnego. Za czynniki dodatkowo sprzyjające mechanizmowi inicjacji i rozwoju pęknięć w złączu spawanym uznaje się mikrostrukturę poszczególnych obszarów złącza (karb strukturalny), zwłaszcza w strefie wpływu ciepła (SWC).

Sposób spawania warstw z materiałów nierdzewnych według wynalazku ma na celu uzyskanie wypełnienia rowka spawalniczego, którego skład chemiczny jest zbliżony do składu spawanych rur dwuwarstwowych nierdzewnych, a poziom właściwości mechanicznych w strefie naprawy jest porównywalny do właściwości materiału rury.

Łączenie rur dwuwarstwowych 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 patentu CN103878484 (B) znany jest sposób zgrzewania doczołowego warstwowych bimetalicznych materiałów kompozytowych. Spawane warstwy bazowe i część warstw zewnętrznych tworzą rowek w kształcie litery I, natomiast rowek między pozostałymi warstwami zewnętrznymi ma kształt litery U. Proces realizowany jest jednoetapowo metodą spawania laserowego penetracyjnego. W procesie ciekły metal w górnej i dolnej części roztopionego jeziora, w jego odpowiednich miejscach, poddawany jest cyrkulacji Marangoniego. Z opisu CN101100013A znany jest sposób spawania rur dwuwarstwowych, których warstwa bazowa wykonana jest ze stali węglowej, a warstwa zewnętrzna jest ze stali nierdzewnej. Proces prowadzi się etapami, które obejmują postępowanie przygotowawcze z oczyszczaniem, fazowaniem i szczepianiem wstępnym rur. Spawanie warstwy bazowej prowadzi się łukiem z elektrodą wolframową w osłonie argonu. Natomiast warstwę zewnętrzną spawa się z zastosowaniem elektrody ze stali nierdzewnej i drutu spawalniczego 309 lub 309 Mo.

Natomiast wynalazek CN112122783A dotyczy spawania laserowo płyt kompozytowych ze stali węglowej oraz niklu lub stopu na bazie niklu z zastosowaniem drutów spawalniczych dostosowanych do gatunku stali.

Wynalazek według CN105414761A dotyczy spawania kompozytów osnową metalową metodą laserową z zastosowaniem proszkowego wypełniania rowka. Postępowanie przygotowawcze obejmuje etap obróbki wstępnej z polerowaniem i czyszczeniem spawanych elementów oraz mieszanie proszku wypełniającego z proszkiem cząstek wzmocnionych. Następnie prowadzi się spawanie z kontrolowaną energią lasera.

Metoda hybrydowego spawania laserowo-łukowego rur stalowych z zewnętrzną powłoką znana jest z opisu RU2684735C1. Rury zestawia się z luzem od 0 do 1 mm, przy którym wartość skosu krawędzi w kształcie litery Y jest dobierana powyżej grubości warstwy platerowanej od 0 do 3 mm. Spawanie prowadzi się łukiem elektrycznym z elektrodą topliwą oraz wiązką laserową o mocy wystarczającej do penetracji metalu i wykonania szwu roboczego od wewnątrz rur. Następnie prowadzi się spawanie na poziomie warstwy platerowanej łukiem elektrycznym z drutem stopowym, oddalonym od wiązki laserowej na odległość 6–15 mm. Na szew roboczy nakładana jest ochronna warstwa zewnętrzna.

Wynalazek znany z CN107150174(B) ujawnia sposób polepszania wytrzymałości wiązania wewnętrznej warstwy powłoki i zewnętrznej warstwy podstawowej w połączonej mechanicznie rurze bimetalicznej. Sposób polega na wykonaniu po stronie wewnętrznej wzdłużnych złączy warstw rury przez spawanie laserowe z drutem spawalniczym.

Znane z opisu patentu US9956642B2 rury kompozytowe z miedzi i stali wytworzono z zastosowaniem spawanego złącza o konstrukcji kielichowej. Publikacja międzynarodowa WO2019188431A1 ujawnia sposób spawania materiałów kompozytowych metalowych, który obejmuje: etap formowania ściegu spawalniczego przez ukośne przyłożenie wiązki laserowej z jednej strony materiału metalowego w kierunku pozycji celowania na powierzchni końcowej innego materiału metalowego lub wystającą z niego powierzchnię; oraz etap, w którym spawanie jest przeprowadzane za pomocą drutu lub materiału spawalniczego od strony powierzchni dwóch materiałów metalowych, a głębokość D docelowego położenia wiązki laserowej mieści się w zakresie $0,8 t$ do $1,8 t$ w odniesieniu do grubości t jednego materiału metalowego. Natomiast odstęp doczołowy między łączonymi materiałami wynosi $t/6$ lub mniej.

Znane jest również laserowe napawanie powłok z materiałów proszkowych na powierzchni produktu, które polega na w tym, że materiał proszkowy jest topiony przez wiązkę laserową w pewnej odległości od jeziorka spawalniczego na podłożu napawanym a następnie podawany do niego w stanie stopionym. Materiał jeziorka spawalniczego poza obszarem oddziaływania lasera krzepnie tworząc powłokę na powierzchni.

Z zastosowaniem lasera oraz dysz proszkowych prowadzi się również wytwarzanie przyrostowe 3D produktów.

Sposób spawania warstw z materiałów nierdzewnych rur dwuwarstwowych, według wynalazku, w którym spawa się rury dwuwarstwowe zestawione ze szczeliną na wspólnej osi obrotu, a jeziorko napoiny z osłoną gazową wytwarza wiązką promieniowania laserowego o regulowanej energii liniowej oraz stosuje materiał proszkowy transportowany gazem i dozowany współosiowo z wiązką promieniowania laserowego przez dysze strumieniowe rozmieszczone obwodowo na głowicy, poddany interakcji termicznej, charakteryzuje się tym, że

- do jeziorka napoiny podaje się skoncentrowany strumień proszku metalicznego, podgrzany przez interakcję termiczną zogniskowanych strumieni proszku metalicznego z wiązką promieniowania laserowego o mocy 1500+ 2800 W, korzystnie 2500 W, gdzie ognisko strumieni tego proszku znajduje się w odległości $10 \text{ mm} < h > 20 \text{ mm}$, korzystnie $h=16 \text{ mm}$ od czołowej powierzchni głowicy,
- i prowadzi napawanie jedno- lub wielowarstwowe, a każdy ścieg warstwy wykonuje się ciągłą linią śrubową aż do jej wypełnienia, przy czym następujące po sobie ściegi n oraz $n+1$, wykonuje przy przeciwnych zwrotach obrotu osi,
- ponadto proszek metaliczny wprowadza się z prędkością przepływu V_n od 0,8 do 1,5 m/min.

Stosuje się ścieg odpuszczający z zakładką 30% - 60%, korzystnie 50% na co najmniej pierwszej warstwie podłoża.

Wiązkę promieniowania laserowego generuje się jako ciągłą a obszar ogniskowania wiązki laserowej ma średnicę 2 do 4 mm, korzystnie 3 mm.

Głębokość wtopienia w podłoże pierwszej warstwy jest mniejsza od 1 mm.

Sposób według wynalazku w wyniku zastosowanych warunków procesowych, a także linii ściegu oraz techniki odpuszczającej zapewnia uzyskanie korzystnej mikrostruktury oraz geometrię złącza o odpowiednim kształcie i bez odprysków spawalniczych na powierzchni. Ma to także wpływ na zwiększenie jego odporności korozyjnej. Ponadto materiał napoiny wykazuje niewielki stopień wymieszania z materiałem podłoża, co zapobiega wprowadzeniu wtrąceń i późniejszych reakcji wtórnych wywołanych oddziaływaniem warunków środowiska.

Sposób spawania według wynalazku zilustrowano przykładowym wykonaniem złącza oraz jego parametrami na rysunku na którym Fig. 1 przedstawia układ głowicy z kanałami transportującymi proszek na podłoże, Fig. 2 w uproszeniu jeden ścieg pierwszej warstwy na podłożu, Fig. 3 i Fig. 4 schematycznie łączenie warstw w napoinie, Fig. 5 wykres zależności ilości transportowanego proszku oraz obrotów tarczy dozującej, Fig. 6 rozkład pierwiastków w napoinie, Fig.7 w uproszczeniu cechy geometryczne ściegu z zakładką, Fot.1

przedstawia złącze rur dwuwarstwowych, Fot. 2 etap realizacji pierwszej warstwy, a Fot. 3 zgląd makrograficzny złącza z przykładu 1.

Sposób spawania warstw z materiałów nierdzewnych rur dwuwarstwowych polega na utworzeniu obwodowego złącza przez napawanie, przy czym warstwa ta może stanowić warstwę zewnętrzną lub wewnętrzną rury. Etap przygotowania rur do spawania obejmuje odpowiednią obróbkę mechaniczną, w tym wykonanie rowka spawalniczego. Następnie rury zestawia się szczeliną od 0,001 do 0,2 mm, a w czasie tworzenia złącza rury dwuwarstwowe umieszczone są współosiowo w obrotniku, niepokazanym na rysunku, i wykonują ruch obrotowy.

Sposób spawania warstw wytworzonych z materiałów nierdzewnych o strukturze austenitycznej na podłożu ze stali ferrytyczno-perlitycznej z zastosowaniem materiału proszkowego metalicznego (proszku) zostanie opisany na przykładzie realizacji.

Przebieg procesu spawania zależy od doboru parametrów, które odnoszą się do wiązki promieniowania laserowego (wiązki laserowej) i optycznego systemu ogniskowania wiązki, materiału proszkowego i systemu jego transportu, techniki oraz prędkości napawania, a także innych. Parametry te kształtują przebieg procesu napawania poprzez wzajemne oddziaływanie w dwóch obszarach: wiązka laserowa – proszek oraz wiązka laserowa – proszek – podłoże napawane.

Proces wypełnienia warstwy zewnętrznej rury dwuwarstwowej prowadzono głowicą do napawania laserowego, wyposażoną w trójdrożną dyszę procesową, której zadaniem jest wytworzenie ogniska strumieni z materiału proszkowego współosiowo do wiązki promieniowania laserowego (Fig.1).

Spawanie laserowe jest procesem spawalniczym, w którym stopione stopiwo (proszek) układane jest na powierzchni materiału podstawowego przy jednoczesnym podtopieniu podłoża, w celu nadania powierzchni wymaganych wymiarów albo wytworzenia na nim warstwy powierzchniowej o specjalnych właściwościach, takich jak odporność na korozję.

Materiał proszkowy do napawania dostarczany jest do dyszy procesowej z dystrybutora proszku, w którym możliwe jest komponowanie jego składu. Bezpośrednio przed wprowadzeniem do dysz, materiał proszkowy metaliczny homogenizuje się i miesza z gazem transportującym, a jego strumień dzieli na pojedyncze strumienie wprowadzane odpowiednio do każdej z dysz, rozłożonych równomiernie na obwodzie, przez połączone z nimi kanały. Do transportu strumienia proszku metalicznego stosuje się hel o czystości 99,9996%.

Każdy wyprowadzany z dyszy strumień proszku metalicznego usytuowany jest pod kątem w stosunku do osi dyszy, a koncentracja strumieni w ognisku znajduje się w odległości h od czołowej powierzchni głowicy (z dyszami). Ustalono, że odległość $h=16 \pm 2$ mm z pozo-

stałymi parametrami procesowymi, dotyczącymi spawania laserowego oraz podajnika proszku, zapewnia równomierne stopienie materiału dodatkowego oraz prawidłowe uformowanie napoiny. Oprócz koncentrowania proszku metalicznego tj. przecięcia strumieni tego proszku – w ognisku ma miejsce interakcja termiczna wszystkich strumieni z wiązką lasera, a do strumienia proszku przenika część energii wiązki w wyniku czego ziarna proszku zostają podgrzane do temperatury poniżej temperatury topnienia lub stopione.

Do ochrony ciekłego jeziora, jako gaz osłonowy stosuje się argon. Osłona z argonu chroni strefę spoiny przed utlenianiem, zapewnia kontrolę obłoku plazmy oraz stabilne prowadzenie procesu napawania, a także poprawne uformowanie lica napoiny.

Ilość transportowanego proszku ustala się poprzez dobór natężenia przepływu gazu transportującego i obroty tarczy przenoszącej proszek z pojemnika do przewodu przesyłowego (Rys. 5). Pojemniki stosowane do prób napawania wyposażono w standardową tarczę (płyta dozująca) z rowkiem o szerokości 5 mm i głębokości 0,7 mm.

Ustalono, że natężenie przepływu gazu nośnego jest optymalne przy obrotach tarczy w zakresie 5-7 obr./min dla proszku o ziarnistości 45+90 μm , gdzie stosowano Inconel 625. Zwiększenie obrotów tarczy powyżej 7 powoduje straty w proszku z uwagi na niecałkowite przetopienie. Napawanie prowadzi się z prędkością przepływu strumienia proszku V_n od 0,8 do 1,5 m/min.

Warunki napawania warstw z materiałów nierdzewnych weryfikowano w celu uzyskania napoiny poprawnej geometrycznie oraz z optymalną mikrostrukturą.

W wyniku badań ustalono, że zwiększenie odległości położenia ogniska h do 20 mm lub obniżenie do 10mm powoduje, że strumień proszku jest nieosiowo podawany oraz nierównomierne stopienie proszku przez wiązkę lasera. Proces spawania proszkowego prowadzono laserem o regulowanej energii liniowej z mocą w przedziale 1500+2800 W.

Stosowanie mocy około 3000 W powoduje zbyt duże wtopienie w materiał podstawowy (podłoża), zwiększa stopień wymieszania materiału napoiny z materiałem podstawowym, i ma niekorzystny wpływ na odporność korozyjną przez zwiększoną ilość żelaza wprowadzaną do napoiny. Natomiast moc lasera poniżej 1500 W jest niewystarczająca do stopienia proszku metalicznego. Wiązkę promieniowania laserowego generuje się jako ciągłą, a obszar ogniskowania wiązki laserowej ma średnicę 2 do 4 mm.

Spawanie realizowano wiązką rozogniskowaną ciągłą, dla której położenie ogniska wiązki ustawiano w odległości 25-30 mm od płaszczyzny ogniskowania proszku, dla uzyskania obszaru jej ogniskowania o średnicy około 3 mm. Zmiana położenia ogniska wiązki laserowej jest realizowana poprzez sterowanie elektryczne położeniem kolimatora.

Jak już napisano, w czasie tworzenia złącza rury dwuwarstwowe umieszczone są w obrotniku, a parametry które zmienia się podczas napawania to kierunek obrotu łączonych rur oraz posuw głowicy procesowej, przy czym są one zawsze przeciwbieżne.

Napawanie laserowe warstw prowadzi się jedno- lub wielowarstwowo ze ściegiem odpuszczającym na co najmniej pierwszej warstwie podłoża, przy czym ilość napawanych warstw zależy od grubości spawanych materiałów. W warstwie każdy ścieg wykonuje się ciągłą linią śrubową, przy czym następujące po sobie ściegi n oraz $n+1$ wykonuje się przy przeciwnych zwrotach obrotu osi łączonych rur. W tym celu po rozpoczęciu procesu napawane rury obraca się w obrotniku po linii śrubowej w kierunku przeciwnym do posuwu głowicy lasera. Przykładowy ścieg pierwszej warstwy pokazany na Fig. 2 wykonano przez cztery obroty osi z rurami zamocowanymi w obrotniku.

W przykładzie pokazanym na Fig. 3 i 4, ilustrujących tworzenie napoiny, do wypełnienia pierwszej warstwy zakłada się wykonanie trzech ściegów wypełniających rowek spawalniczy z zakładką, a do wypełnienia drugiej warstwy - czterech ściegów wypełniających tworzących lico. Stosowanie napawania z zakładką powoduje, że każdy następny ścieg wpływa na mikrostrukturę ściegu wcześniejszego przez oddziaływanie wprowadzaną energią cieplną.

Realizowane spawane złącze rur ze ściegami pierwszej warstwy wykonanymi liniami śrubowymi pokazano na Fot. 2. Ilość obrotów osi dla wykonania ściegu zależy od szerokości rowka spawalniczego. Początek kolejnej warstwy stanowi punkt końcowy napawania warstwy poprzedniej i realizowany jest na wysokości już wytworzonej spoiny. W procesie stosuje się ścieg odpuszczający z 30-60% zakładką, korzystnie 50%. Technika ściegu odpuszczającego (ang. temper bead welding) wykorzystuje kontrolowaną metodę osadzania ściegu spoiny dla uzyskania modyfikacji mikrostrukturalnej w obszarze strefy wpływu ciepła. Napawanie wielościegowe powoduje, że każdy kolejny ścieg odpuszcza poprzedni, co wpływa na rozdrobnienie wielkości ziarna w obszarze strefy wpływu ciepła i pozwala na uzyskanie korzystnych właściwości spoiny. Przy spoinie wielowarstwowej zmiany dotyczą całego złącza, w tym obniżenie twardości w napoinie oraz uzyskanie dobrych własności plastycznych.

Z zastosowaniem wyżej opisanych warunków oraz 30-60% zakładką uzyskuje się w pierwszej warstwie głębokość wtopienia w podłoże mniejszą od 1 mm. Dla ustalonego obszaru ogniskowania wiązki laserowej o średnicy około 3 mm ścieg ma szerokość 3 mm.

W przykładowych realizacjach sposobu stosowano rurę dwuwarstwową 3R12/4L7 oraz Sanicro 38/4L7. W rurze 3R12/4L7 materiał membrany (warstwa zewnętrzna) odpowiada stali o strukturze austenitycznej z gatunku AISI 304 (1.4301). Natomiast warstwa zewnętrzna 38 w rurze Sanicro oznacza stop niklu 825 (2.4858). Zarówno stal 3R12, jak i stop niklu 825 zapewniają odporność korozyjną z uwagi na zawartość chromu i niklu. Ponadto w obydwu rurach podłoże ferrytyczno-perlityczne wykonano ze stali 4L7. Nominalny skład chemiczny materiału podstawowego zawierają poniższe tabele 1 i 2.

Tabela 1

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		

Tabela 2

2.4858 Alloy 825	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	Cu	N	Nb	Ti	Fe
min.						19,5	2,5	38,0			1,5			0,6	22,0
max.	0,05	0,05	1,0		0,03	23,5	3,5	46,0		0,2	3,0			1,2	

Rowek spawalniczy warstw zewnętrznych łączonych rur dwuwarstwowych wypełnia się materiałem o takim samym lub zbliżonym składzie chemicznym, ale po uprzednim wykonaniu połączenia warstwy wewnętrznej wykonanej ze stali P265GH.

Proces napawania proszkowego laserowego warstwy zewnętrznej rur dwuwarstwowych z gatunku 3R12/4L7 oraz Sanicro 3B/4L7 prowadzono z wykorzystaniem proszku stopu Inconel 625 niklowo-chromowego z dodatkiem molibdenu i niobu o granulacji ziarna 45 μm + 90 μm , którego skład chemiczny przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3

INC 625		Skład chemiczny, % wag.										
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Fe	Ti	Nb+Ta
%	≤ %	≤ %	≤ %	≤ %	%	%	%	%	≤ %	≤ %	%	%
0,03	0,4	0,5	0,01	0,01	21,0-23,0	8,0-10,0	reszta	0,4	1,0	1,0	0,4	3,2-3,8

Uwagi: * – ziarnistość proszku 45+90 μm

Spawanie laserowe proszkowe warstw zewnętrznych rur dwuwarstwowych przeprowadzono na zrobotyzowanym stanowisku z robotem przemysłowym KUKA KR30HA, laserem dyskowym YAG o mocy 12 kW TruDisk 12002, specjalistyczną głowicą do napawania proszkowego oraz podajnikiem proszku typu PF2/2. Głowica posiada soczewkę ogniskującą o ogniskowej 220 mm oraz kolimator 150 mm. Wiązkę promieniowania laserowego wprowadzano do głowicy za pomocą standardowego światłowodu o średnicy 300 μm . Elektryczne sterowanie położenia soczewki kolimatora głowicy umożliwia automatyczną zmianę położenia ogniska wiązki laserowej w zakresie -4,3 mm do +48,1 mm, a tym samym zapewnia możliwość zmiany wielkości obszaru ogniskowania promieniowania lase-

rowego. Do wykonania przykładowych napoin (spoin) stosowano laser o mocy P 2,5 kW lub 2 kW. W głowicy do spawania zainstalowano trójdrożną dyszę procesową MultiJet, za pomocą której tworzone ogniska strumieni proszku Inconel 625 współosiowo do wiązki promieniowania laserowego. Trzy strumienie proszku, usytuowane pod kątem w stosunku do osi dyszy, skoncentrowano w odległości $h=16$ mm od czołowej powierzchni głowicy (Fig.1). Odległość ta, w powiązaniu z parametrami zapewnia stabilne dostarczanie proszku oraz bezpieczne używanie głowicy.

Ilość podawanego proszku podlega kontroli poprzez dobór natężenia przepływu gazu transportującego i obroty tarczy przenoszącej proszek z pojemnika do przewodu przesyłowego. W przykładowych procesach napawania tarcza dozująca proszek o uziarnieniu $45 \mu\text{m}$ do $90 \mu\text{m}$ wykonywała 6 lub 7 obr./min, a proszek podawano odpowiednio w ilości 14 g/min do 16 g/min. Jako gaz transportujący proszek z podajnika do głowicy stosowano gaz szlachetny hel o objętości strumienia 6 l/min. Podczas napawania prędkość przepływu proszku V_n wynosiła 1 m/min. W procesie napawania proszkowego stosowano osłonę gazową jeziora spawalniczego argonem o czystości 99.995% (Argon 5.0), którego strumień objętości wynosił 15 l/min. Osłona gazowa wpływa na stabilność procesu napawania i umożliwia poprawne uformowanie lica spoiny.

Natomiast położenie ogniska wiązki promieniowania laserowego ustawiono w odległości 25 mm od płaszczyzny ogniskowania proszku i ustalono obszar ogniskowania wiązki laserowej o średnicy około 3 mm (2,74 mm).

Proces laserowego spawania proszkowego rur dwuwarstwowych prowadzono prostopadle do osi styku łączonych rur umieszczonych w obrotniku, w którym ruch obrotowy śrubowy wykonuje element spawany (rura), a głowica jest nieruchoma.

Parametry przykładowych procesów laserowego spawania proszkowego warstw zewnętrznych ze stali 3R12 oraz stopu niklu 825 rur dwuwarstwowych przedstawiono w tabeli 4, a tabela 4A zawiera parametry związane z podajnikiem proszku.

Tabela 4

	Warstwa/ Ścieg	Moc lasera P [kW]	Prędkość spawania V_n [m/min]	Zakładka m [mm]	Średnica ogniska $d_{og.}$ [mm]
Przykład 1 stal 3R12	1 ścieg	2,5	1	0	3
	następne			1,5	
Przykład 2 stop niklu 825	1 ścieg	2,0	1	0	3
	następne			1,0	

Tabela 4A

	Obroty tarczy dozującej proszek [obr/min]	Ilość proszku [g/min]	Strumień obj. gazu transportującego proszek [l/min]	Strumień obj. gazu osłonowego jeziorka [l/min]
Przykład 1	6	14	6	15
Przykład 2	7	16	6	15

Spawanie laserowe warstw zewnętrznych ze stali 3R12 rur dwuwarstwowych prowadzi się wielowarstwowo ze ścięciem odpuszczającym. W przypadku spawania warstwy zewnętrznej o grubości 1,82 mm rur dwuwarstwowych o średnicy zewnętrznej 63,5 mm, zgodnie z parametrami podanymi w Tabeli 4 i 4A, szerokość napoiny wynosiła 3 mm, a stosowana zakładka wynosiła 1,5 mm. Rowek spawalniczy wypełniają dwie warstwy (Fot. 1).

Według opisanego postępowania, z zastosowaniem parametrów przykładu 2, prowadzono również spawanie laserowe warstw zewnętrznych rur dwuwarstwowych ze stopu niklu 825. Ściegi pierwszej niewypełnionej warstwy złącza pokazano na Fot. 2, przy czym ilość warstw zależy m. innymi od grubości warstwy z materiałów nierdzewnych.

Sposób spawania warstw zewnętrznych rur realizowany w przykładowych wykonaniach pozwala na uzyskanie prawidłowego wypełnienia rowka. Uzyskane w procesie napawania laserowego proszkowego napoiny, pokazane na zglądzie, charakteryzuje prawidłowo, równomiernie uformowane lico, o szerokości 7 mm i wysokości ok. 1 mm.

W celu ustalenia cech mikrostruktury złącza prowadzono m. innymi badanie rozkładu pierwiastków stopowych w obszarze napoiny za pomocą mikroskopu skaningowego wyposażonego w system mikroanalizy rentgenowskiej ze spektrometrem EDS.

Złącze warstw zewnętrznych rur dwuwarstwowych wykonanych zarówno ze stali 3R12 jak i Sanico 38, charakteryzuje się prawidłowym rozkładem pierwiastków stopowych w warstwie napoiny, jak pokazano na wykresie na Fig. 6. Udział procentowy chromu utrzymywał się na poziomie 16% wag., przy wymogu zawartości Cr minimum 10,5% wag. Natomiast zawartość niklu ustalono na poziomie 40% wag. Ponadto ustalono, że zawartość żelaza jest znacząco mniejsza od wartości 10% dopuszczonych normą.

DYREKTOR
Adam Pietras
 dr inż. Adam Pietras