

**Sposób łączenia spawaniem wiązką lasera elementów konstrukcyjnych
ze stali wysokowytrzymałej o gwarantowanej granicy plastyczności
1300 Mpa po obróbce cieplnej**

Przedmiotem wynalazku sposób łączenia spawaniem wiązką lasera elementów konstrukcyjnych ze stali wysokowytrzymałej o gwarantowanej granicy plastyczności 1300 MPa po obróbce cieplnej, gwarantowanej szczególnie w obszarze 25 mm od miejsca spawania przy krawędziach o grubości od 4 do 6 mm.

Z literatury znane są technologie spawania laserowego, np. w „Technologie laserowe. Spawanie, napawanie, stopowanie, obróbka cieplna i cięcie” (A. Klimpel, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012) opisano zarówno podstawy teoretyczne promieniowania laserowego w powiązaniu z technologiami laserowymi: spawania, napawania, stopowania, przetapiania, obróbki cieplnej oraz cięcia laserowego, jak i budowę i zasadę działania nowoczesnych laserów gazowych CO₂ oraz laserów na ciele stałym, włóknowych, tarczowych i diodowych. Omówiono warunki technologiczne każdego z procesów laserowych wraz z przykładami zastosowania przemysłowego.

W publikacji „Technologie hybrydowe w spawalnictwie” (A. Szulc, Pol. Wrocławska, Wrocław 2015) omawia różne technologie spawania, a między innymi stosowanie technologii hybrydowej dla spawania konstrukcji wykonanych z blach platerowanych: polega ono na połączeniu ze sobą arkuszy wykonanych z dwóch różnych metali. Cieńszy jest wykonany z droższego materiału o szczególnych właściwościach, a grubszy - z materiału tańszego. Nakłada się jeden arkusz na drugi i łączy się ze sobą. Prowadzi się taki proces zwykle na zimno, a więc można tworzyć połączenia bardzo różnorodnych materiałów. Typowym zastosowaniem są rurociągi i zbiorniki dla przemysłu chemicznego, których wewnętrzne powierzchnie muszą być wykonane z metali o odpowiedniej odporności korozyjno-erozyjnej. Innym zastosowaniem może być łączenie takich materiałów jak tworzywa sztuczne (Patent EP 1117502 z 2005 r.).

Od kilkunastu lat najlepszą metodą wysokowydajnego spawania cienkich blach stalowych jest spawanie plazmowe i laserowe. Obie metody zapewniają wąską strefę wpływu ciepła, co zmniejsza odkształcenia konstrukcji, obniża ryzyko powstania pęknięć i zmniejsza zużycie energii. Wyniki procesu spawania, zwykle zautomatyzowanego lub zrobotyzowanego, są wysoce powtarzalne, a zastosowanie urządzeń dużej mocy pozwala na osiąganie nadzwyczaj wysokich prędkości spawania. Obie metody wymagają jednak precyzyjnego przygotowania krawędzi elementów spawanych i gwałtownie tracą na atrakcyjności wraz ze wzrostem grubości łączonych elementów, gdyż wymaga to zastosowania źródeł energii o nieliniowo rosnącej mocy.

Istnieje możliwość połączenia technologii plazmowej lub laserowej z którąś z tańszych i zdecydowanie wydajniejszych metod spawania, zwykle GMA lub SAW. Urządzenie laserowe lub plazmowe zapewnia precyzyjne przetopienie grani spoiny (czyli jej pierwszej i najbardziej oddalonej od źródła ciepła warstwy, której jakość decyduje o jakości całej spoiny i konstrukcji), a urządzenie "klasyczne" wydajnie wypełnia rowek spawalniczy. Połączenie obu głowic w jedną całość umożliwi ich wspólne prowadzenie, lepsze wykorzystanie ciepła, generowanego przez oba urządzenia, a w przypadku wykorzystania metody GMA – także wspólną osłonę gazową strefy spawania i obu głowic.

W przypadku zastosowania technologii laserowej jako elementu technologii hybrydowej wymagania dotyczące przygotowania detali są bardzo wysokie, szczególnie jeśli chodzi o wzajemne położenie łączonych elementów oraz geometrię krawędzi na grubości spawanej laserem. Wysokie są także wymagania dotyczące dokładności prowadzenia głowicy i szeroko pojętej kultury technicznej procesu. Warunkiem uznania technologii spawalnej za hybrydową jest tworzenie za pomocą kilku źródeł ciepła wspólnego jeziora spawalniczego.

Znane jest spawanie hybrydowe z wykorzystaniem lasera, znane jako HLAW (hybrid laser arc welding – hybrydowe spawanie laserowo-łukowe), od 2013 r. funkcjonuje także w Polsce odpowiednia norma w tej kwestii. Do niedawna komponentem urządzeń hybrydowych były niemal wyłącznie lasery gazowe CO₂, ale ostatnio coraz częściej stosuje się lasery diodowe oraz włóknowe, które zapewniają wprawdzie mniejszą gęstość mocy, ale też i znacznie większą sprawność, oraz, co nadzwyczaj istotne ze względu na uproszczenie konstrukcji głowic. Wiązka może być przekazywana za pomocą włókien optycznych, a nie układu zwierciadeł.

Urządzenia laserowe łączy się zwykle z głowicami do spawania łukowego elektrodą

topliwą w osłonie gazowej. Takie połączenie pozwala na stosunkowo proste wykorzystanie zalet obu metod i wyeliminowanie ich wad. Wiązka laserowa szybko nagrzewa krawędzie łączonych elementów na znacznej głębokości, łuk elektryczny także nagrzewa materiał rodzimy, ale też topi materiał dodatkowy, którego skład można dobierać w taki sposób, aby modyfikować właściwości spoiny. Równocześnie do spawania w jednym przejściu materiału o zadanej grubości wystarcza laser o mniejszej mocy, niż w przypadku samego spawania laserowego. Połączenie działania obu źródeł ciepła powoduje zachowanie wąskiej strefy wpływu ciepła, ale zmniejsza prędkość chłodzenia i ryzyko nadmiernego utwardzenia materiału. Na drodze eksperymentalnej stwierdzono, że w przypadku spawania metodą HLAW blach karoseryjnych, także powlekanych, zapewnia zmniejszenie zapotrzebowania na energię o nawet 80%, radykalne zwiększenie prędkości spawania w porównaniu ze spawaniem klasycznym, a tolerancja dokładności przygotowania elementów do spawania może być 2-3 razy większa niż w przypadku spawania wyłącznie laserowego. Wraz ze wzrostem grubości materiału korzyści z użycia metody hybrydowej są jeszcze większe – prędkość spawania może zwiększyć się nawet dziesięciokrotnie, a czas spawania, np. elementów konstrukcji okrętowych, skraca się nawet o 80%.

Problemem, szczególnie przy spawaniu stali stopowych o podwyższonych właściwościach, jest szeroka strefa wpływu ciepła i ogólnie – trudność w kontrolowaniu strumienia ciepła dopływającego do materiału.

Znane są urządzenia łączące głowicę laserową z głowicą GTA (z elektrodą nietopliwą), ale ich zastosowanie ogranicza się do stosunkowo rzadkich sytuacji, gdy spoiny mają być wykonywane bez materiału dodatkowego, a użycie metody hybrydowej daje korzyści przede wszystkim wynikające z mniejszej dokładności przygotowania spawanych elementów.

Jednym z nowszych sposobów precyzyjnego kontrolowania procesu jest wprowadzenie dodatkowego pola elektromagnetycznego w strefie spawania. W wersji Super-MIG umożliwia spawanie w jednym przejściu stali o grubości do 13 mm, a w wersji Super Heavy Duty – nawet 20 mm. W niektórych zastosowaniach, np. zastępując spawanie ścian szczelnych łukiem krytym, umożliwia nawet dziesięciokrotny wzrost wydajności łączenia. Równocześnie koszt urządzenia jest znacznie niższy niż hybrydowej głowicy laserowej, a znacznie niższa masa głowicy w porównaniu z urządzeniami klasycznymi umożliwia stosowanie lżejszych, a więc tańszych manipulatorów i robotów.

Produkowane są również hybrydowe urządzenia laserowo-plazmowe, ale akurat to połączenie wydaje się być najmniej uzasadnione, gdyż oba te procesy są do siebie podobne i w niewielkim stopniu wzajemnie się uzupełniają.

Zastosowanie spawania laserowego elementów cienkościennych omówiono w publikacji pt. „Wykorzystanie technik laserowych do spawania elementów o małych wymiarach w Centrum Laserowym Instytutu Spawalnictwa” (J. Pilarczyk i in., w „Problemy Eksploatacji” nr 4-2011, Instytut Spawalnictwa, Gliwice 2011). Wiązka promieniowania laserowego jest wykorzystywana w różnorodnych procesach technologicznych, takich jak: cięcie, spawanie, znakowanie, hartowanie powierzchniowe, napawanie, przetapianie, mikroobróbka. Źródłami promieniowania laserowego są lasery: gazowe CO₂, lasery na ciele stałym (lasery Nd:YAG, Yb:YAG, Yb:Glaas) oraz lasery diodowe. Wzrastającym zainteresowaniem cieszą się lasery na ciele stałym, co wynika szczególnie z wysokiej mocy (kilkanaście kilowatów) wiązki promieniowania osiąganego przez powszechnie już dostępne na rynku konstrukcje najnowszej generacji oraz krótszej długości fali promieniowania laserowego – ok. 1 μm w porównaniu z laserami CO₂, a to bezpośrednio przekłada się na możliwość transportu promieniowania laserowego z rezonatora do głowicy laserowej za pomocą światłowodów oraz na skuteczniejszą absorpcję promieniowania, zwłaszcza przez metale silnie odbijające. Dzięki temu uzyskuje się możliwość znacznego rozszerzenia aplikacji przemysłowych i objęcia obszarów dotychczas nieosiągalnych dla laserów CO₂. Równolegle z laserami na ciele stałym o dużej mocy kilkunastu kilowatów rozwijane są lasery YAG o niewielkiej mocy średniej (do około kilkuset wat). Charakteryzują się one dobrą jakością wiązki, a ich konstrukcja umożliwia pracę w trybie impulsowym i pomimo stosunkowo małej mocy średniej – uzyskanie dużych wartości mocy szczytowych w impulsie (kilka kW). Emisja wiązki promieniowania lasera YAG w trybie impulsowym wynika z impulsowego wzbudzenia rezonatora lasera i chwilowego znacznego obciążenia elementu czynnego – kryształu Nd:YAG (Patent US 8314359 B2 Methods and systems for laser welding transparent metals with ultrashort pulsed laser – 16.10.2009). Stąd lasery te są opisywane nie maksymalną mocą wiązki laserowej, ale energią, jaką mogą one wydatkować (Patent US 3383491A Laser welding Machine – 14.05.1968 r.). Maksymalna energia lasera impulsowego decyduje o możliwości uzyskania impulsu o określonej mocy, czasie trwania oraz częstotliwości powtarzania impulsów. Spoina wytwarzana przez wiązkę laserową emitowaną w trybie impulsowym składa się z wielu zachodzących na siebie pojedynczych spoin punktowych.

Stopień zachodzenia na siebie poszczególnych impulsów określony w procentach, tzw. zakładka, oznacza, w jakim stopniu obszar przetopionego materiału przez pojedynczy impuls zachodzi na podobny obszar wytworzony przez impuls poprzedni. Za pomocą określonej zakładki (prędkości spawania oraz częstotliwości powtarzania impulsów) można regulować szczelność spoiny, rzeczywistą głębokość wtopienia oraz ilość ciepła wprowadzane-go do materiału spawanego, a także wpływać na jednorodność struktury spoiny. Taki tryb pracy lasera znajduje szczególne zastosowanie do spawania cienkościennych konstrukcji, wrażliwych na duże ilości ciepła wprowadzanego do złącza, powodujące odkształcenia lub pęknięcia.

Problem spawania elementów cienkościennych rozwiązuje spawanie laserowe, prowadzone w trybie ciągłym lub impulsowym. W trybie ciągłym pracy lasera możliwe jest uzyskiwanie spoin o głębokości nawet kilku dziesiątych części milimetra. Jednakże technika ta może być stosowana, kiedy elementy cienkościenne łączone są z elementami masywnymi, mającymi możliwość odprowadzania ciepła. Przykładem są tu obudowy delikatnych lub specjalnych przedmiotów. Spoiny wykonywane są w trajektorii zamkniętej, zazwyczaj z brakiem pełnego przetopu, ze względu na czułość na termiczne oddziaływanie wiązki laserowej tego, co zawiera obudowa. W przypadkach wrażliwości spawanych elementów zarówno na oddziaływanie wiązki laserowej, jak i na ciepło wydzielane w procesie spawania oraz elementów o niewielkich gabarytach, które nie są zdolne do odprowadzania ciepła powstającego w procesie spawania, dobre wyniki daje spawanie laserowe wiązką emitowaną w trybie impulsowym. Wtedy spoinę końcową tworzą pojedyncze spoiny punktowe zachodzące na siebie, a każda kolejna spoina punktowa układa się po zakrzepnięciu poprzedniej. Spektakularnym przykładem tego typu wyrobów są spawane laserowo rozruszniki serca.

W „Spawanie laserowe blach elektromagnetycznych” (B. Rzany, 2015) przedkłada spawanie blach elektromagnetycznych laserem włóknowym skanującym nad spawanie z zastosowaniem lasera impulsowego neodymowo-jagowego Nd:YAG i stałą ogniskową. Spawanie laserem włóknowym skanującym zapewnia nie tylko technologiczne, ale także ekonomiczne korzyści w stosunku do metody łączenia laserem Nd:YAG. Warto szczególnie podkreślić dwa korzystne aspekty spawania z użyciem lasera włóknowego skanującego: niską emisję ciepła i niewielki wpływ na właściwości elektromagnetyczne łączonych elementów. Przy spawaniu laserem neodymowym stała ogniskowa wykorzystywana jest z głowicą spawającą, która skupia wiązkę lasera o średnicy 300 μm , a przy spawaniu

laserem włóknowym wiązka ta ma ok. 30 μm . Do tego dochodzi niemal 100-krotnie wyższa gęstość w ognisku wiązki lasera włóknowego.

Zgodnie z geometrycznymi cechami ogniskowej i uzyskaną gęstością energii w punkcie skupienia pojawia się odpowiednia konwersja energii w miejscu tworzenia spoiny. Do tego wiązka lasera włóknowego szybciej uzyskuje żadaną głębokość wtopienia, a dzięki lustrum skanującym można ją prowadzić dokładnie nad spoiną. Dodatkowo, dzięki tak zwanej technice wobulacji wiązka lasera może być prowadzona nie tylko wzdłuż geometrii złącza, lecz może także poruszać się za pomocą luster skanujących – z wysoką, regulowaną częstotliwością mierzoną w kilohercach – w poprzek w stosunku do kierunku powstawania złącza. Używając technologii wobulacji, można wiązką o małej średnicy w ognisku (30 μm) roztopić szerszy i określony obszar połączenia.

Zdaniem autorów badań „Wpływ wymieszania na właściwości spoiny w złączach stali o wysokiej wytrzymałości” (L. Karlsson, L. Svensson, K. Hurtig, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa nr 5/2014), od wielu lat z powodzeniem spawa się stale o granicy plastyczności 900 MPa z zastosowaniem spoiw o porównywalnych wytrzymałościach, zapewniając złączom spawanym odpowiednią wytrzymałość. Niemniej stale rośnie zapotrzebowanie na wykonywanie jakościowych złączy ze stali o jeszcze wyższych właściwościach wytrzymałościowych. W konsekwencji wzrasta zapotrzebowanie na materiały dodatkowe zapewniające odpowiednie właściwości, a także na wiedzę dotyczącą odpowiednich odmian metod spawania i parametrów technologicznych, takich jak ilość wprowadzonego ciepła, temperatura międzyścięgowa oraz ich wpływu na właściwości wytrzymałościowe złączy. Powołują się na wyniki badań opublikowane w „Microstructure and Properties of High Strength Weld Metals” (Svensson L.-E.: Materials Science Forum, Vol.5 39-543, 2007, pp. 3937-3942) i „Trends in the development of steels and their weldability” (de Meester B., Proc. Int. Conf. Advanced metallic materials and their joining. 25-27 Oct. 2004, Bratislava), że aby zapewnić odpowiednią wytrzymałość złączy spawanych, materiały dodatkowe muszą w swoim składzie posiadać większą ilość składników stopowych. Różnice pomiędzy składem chemicznym stali a materiałem dodatkowym są znaczące i wzrastają wraz ze zwiększającymi się właściwościami wytrzymałościowymi zastosowanego materiału podstawowego. W konsekwencji stopień wymieszania stali i materiału dodatkowego będący skutkiem spawania może mieć silny wpływ na właściwości spoiny. Kolejnym czynnikiem wpływającym na jej właściwości jest prędkość stygnięcia. W praktyce zawsze istnieje potrzeba uwzględnienia obu aspektów: wydajności oraz zapewnienia odpowiedniej

wytrzymałości i udarności w spoinie oraz strefie wpływu ciepła (SWC).

Jest to zazwyczaj wyzwaniem, gdyż zwiększenie wydajności może skutkować gorszymi właściwościami SWC materiału podstawowego i/ lub spoiny. W tym przypadku do badań wybrano dwa gatunki wysokowytrzymałej stali, blachy o grubości 12 mm i minimalnej granicy plastyczności odpowiednio 777 MPa i 1193 MPa. Minimalne granice plastyczności materiałów dodatkowych wahały się między 810 a 1006 MPa.

Znany jest z praktyki spawalnictwa sposób spawania stali konstrukcyjnych niestopowych o gwarantowanej granicy plastyczności do 690 MPa i stali stopowych z wykorzystaniem wiązki lasera generowanej przez urządzenia wyposażone w rezonatory gazowe o pracy impulsowej. W wyniku sterowania częstotliwością generowanych impulsów, mocą wiązki w impulsie i średnicą ogniska wiązki i odpowiednim rozkładem mocy w ognisku wiązki tzw. modzie możliwe jest uzyskiwanie kanału parowego otoczonego ciekłym metalem, który następnie krystalizuje tworząc wąską spoinę. Obecność kanału parowego zalewanego ciekłym metalem zapewnia uzyskanie pełnego wtopienia materiałów o grubości od 1 do 10 mm. Spoina charakteryzuje się przeważnie lekko wklęsłym licem i wypukłą lub wklęsłą granią. Przy zastosowaniu optymalnych parametrów procesu możliwe jest uzyskanie spoiny wolnej od tych niezgodności spawalniczych, przy czym nie jest to możliwe do uzyskania bez odpowiednich prób technologicznych i optymalizacji parametrów spawania (E. Tasak, Spawalność stali, Wyd. Jak 2007).

Znany jest sposób spawania wiązką lasera z rezonatorem na ciele stałym, w którym doprowadzenie wiązki lasera następuje w oparciu o układ światłowodów, a ogniskowanie następuje w głowicy spawalniczej przez układ optyczny. Wiązka charakteryzuje się wielomodowością o nie możliwym do określenia rozkładzie gęstości mocy w ognisku wiązki lasera. Lasery te pracują najczęściej jako lasery generujące wiązkę o stałej mocy. Proces spawania umożliwia łączenie stali konstrukcyjnych o granicy plastyczności do 1100 MPa i stali stopowych, przy czym obserwowane jest wklęsnięcie lica prowadzące do zmniejszenia przekroju czynnego złącza spawanego oraz zmniejszenie właściwości mechanicznych spoiny względem materiału rodzimego, przykładowo dla stali S980QL granica wytrzymałość na rozciąganie wynosi ok. 920 MPa, a w strefie wpływu ciepła obserwowane jest występowanie strefy miękkiej. Eliminacja błędów kształtu złącza spawanego, w tym w szczególności następuje przez zamianę procesu spawania tylko wiązką laserową procesami hybrydowymi, w których proces spawania wiązką laserową łączony jest np. z metodą spawania elektrodą nietopliwą w osłonie gazów, elektrodą topliwą w osłonie

gazów lub łukiem plazmowym. W procesach hybrydowych zmniejszenie przekroju czynnego spoiny ograniczone jest przez dodatek materiału dodatkowego (A. Holzner, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 4/2011, pp. 57-67).

Znany jest sposób spawania wiązką lasera stali o wysokiej wytrzymałości o gwarantowanej granicy plastyczności do 1000 MPa elementów o różnej grubości, gdzie uzyskuje się spoiny czołowe w złączach doczołowych, przy czym w złączach tych obserwowana jest znaczna utrata właściwości wytrzymałościowych, a w szczególności wytrzymałości na rozciąganie. Powoduje to, że spawanie stali wysokowytrzymałej obniża właściwości wytrzymałościowe konstrukcji (M. Zeman, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 3/2008, pp. 35-40).

Znany jest sposób spawania hybrydowego polegającego na połączeniu spawania z wykorzystaniem wiązki lasera ze spawaniem łukowym elektrodą topliwą w osłonie gazowej stali wysokowytrzymałej o gwarantowanej granicy plastyczności 1100 MPa. Użykuje się spoiny czołowe z pełnym przetopem i nadlewem lica przy jednoczesnym obniżeniu właściwości wytrzymałościowych złącza w porównaniu z właściwościami materiału spawanego i niekorzystnym „kielichowatym” kształcie w porównaniu ze spawaniem bez użycia materiału podstawowego. W ofercie handlowej dostępne są materiały dodatkowe dla procesów spawania hybrydowego o gwarantowanej wytrzymałości na rozciąganie 1100 MPa, które mogą mieć zastosowanie jedynie dla stali o granicy plastyczności do 1100 MPa. W procesie hybrydowym uzyskuje się niekorzystną budowę spoiny tj. kielichowaty kształt oraz w obszarze oddziaływania łuku elektrycznego obserwowana jest szeroka strefa wpływu ciepła. Skutkiem jest występowanie strefy zmiękczenia w obszarze strefy wpływu ciepła, a więc również nierównomierne właściwości mechaniczne w przekroju poprzecznym złącza spawanego (M. St. Węglowski, M. Zeman, M. Łomozik, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 5/2012, pp. 202-206).

Celem wynalazku jest opracowanie techniki łączenia spawaniem wiązką lasera blach ze stali wysokowytrzymałej, o gwarantowanej granicy plastyczności 1300 MPa po obróbce cieplnej, dla uzyskania wytrzymałości na rozciąganie złącza spawanego nie mniejszej niż 15% wartości granicy plastyczności materiału podstawowego oraz braku zmniejszenia przekroju czynnego spoiny.

Istotą sposobu według wynalazku jest wprowadzanie do złącza spawanego ilości ciepła od 7,7 kJ/m do 12,6 kJ/m, wyliczonej jako iloraz mocy wiązki i prędkości spawania z uwzględnieniem sprawności cieplnej procesu na poziomie 15%. Korzystnie wytwarza

się spoinę o niewklęsłym licu i niewklęsłej grani, zaś wytrzymałość na rozciąganie złącza spawanego wynosi co najmniej 1200 MPa.

Nieoczekiwanie okazało się, że ilość ciepła wprowadzanego do spoiny implikuje gęstość objętościową przetopionego materiału spoiny.

Sposób łączenia spawaniem wiązką lasera elementów konstrukcyjnych ze stali wysokowytrzymałej o gwarantowanej granicy plastyczności 1300 MPa po obróbce cieplnej, polega na przygotowaniu obróbką mechaniczną i/lub strumieniowo-ścierną brzegów łączonych elementów o grubości od 4 do 6 mm, po czym zestawia się je ze sobą i tworzy szczelinę od 0,001 mm do 0,2 mm. Następnie, korzystnie wstępnie podgrzewa się brzegi do temperatury 50-150°C i łączy się, bez materiału dodatkowego, przez spawanie bezpośrednio wiązką lasera o mocy od 3000 W do 5000 W, przy czym do złącza spawanego wprowadza się ilość ciepła od 7,7 kJ/m do 12,6 kJ/m, wyliczoną jako iloraz mocy wiązki i prędkości spawania z uwzględnieniem sprawności cieplnej procesu na poziomie 15%. Korzystnie wytwarza się spoinę o niewklęsłym licu i niewklęsłej grani, a wytrzymałość na rozciąganie złącza spawanego wynosi co najmniej 1200 MPa.

Podczas prób spawania wykorzystane zostały źródła laserowe, których budowa rezonatora oparta jest na ciele stałym (proces 521 zgodnie z normą PN-EN ISO 4063:2009), a wiązka laserowa doprowadzana jest światłowodami do głowicy laserowej przy czym w ognisku uzyskiwany jest wielomodowy rozkład gęstości mocy.

Brzegi blach ze stali S1300QL o gwarantowanej granicy plastyczności 1300 MPa po obróbce cieplnej, o grubości 4 mm przygotowano przez obróbkę strumieniowo-ścierną i szlifowanie mechaniczne dla uzyskania powierzchni płaskiej o stosunkowo niewielkiej falistości, a następnie zestawiono ze sobą uzyskując szczelinę między nimi poniżej 0,2 mm. Następnie elementy łączone zamocowano sztywno w uchwycie na stole montażowym. Proces spawania wykonano laserem włóknowym o mocy wiązki 3600 W z prędkością przemieszczania wiązki wzdłuż brzegów łączonych 3 m/min (to jest 50 mm/s) nie stosując podgrzewania wstępnego przy temperaturze otoczenia ok. 27°C. Wprowadzono do złącza ilość ciepła 10800 J/m, wyliczoną jako iloraz mocy wiązki i prędkości spawania z uwzględnieniem sprawności cieplnej procesu na poziomie 15%. Tak wykonane złącze spawane posiada granicę plastyczności $Re=1230$ MPa i wytrzymałość na rozciąganie 1320 MPa. Złącze posiada niewklęsłą grań i niewklęsłe lico, a niezgodności spawalnicze w objętości spoiny mieszczą się w najwyższym poziomie jakości B wg PN-EN ISO 13919.

Pełnomocnik


Rzecznik-Patentowy
mgr inż. Andrzej Fus