

INNOWACYJNOŚĆ PROCESOWA W SPAWANIU LASEROWYM Z WYKORZYSTANIEM TECHNOLOGII CHŁODZENIA MIKRO-JET

Tomasz WĘGRZYN, Jan PIWNIK, Jacek JAWOR, Paweł KULAK, Bożena SZCZUCKA-LASOTA, Adam KONOPKA

Streszczenie: Artykuł przedstawia zastosowanie nowej technologii spawania stali z wykorzystaniem chłodzenia mikro-jetowego w spawaniu laserowym. Prezentowane badania wskazują, że innowacyjne rozwiązanie zapewnia bardzo precyzyjne chłodzenie złączy bezpośrednio po spawaniu i wpływa na podwyższenie własności użytkowych spawanych konstrukcji, w tym wyższą udurowienie złączy spawanych w ujemnej temperaturze. Kolejną istotną zaletą procesu mikro-jetowego jest zmniejszenie spawalniczych naprężeń cieplnych w przestrzennych konstrukcjach stalowych. Porównano złącza wykonane w osłonie gazów ochronnych i laserowo.

Słowa kluczowe: sterowanie strukturą złącza, lokalne i selektywne chłodzenie, chłodzenie mikro-jetowe, spawanie laserowe, spawanie MAG

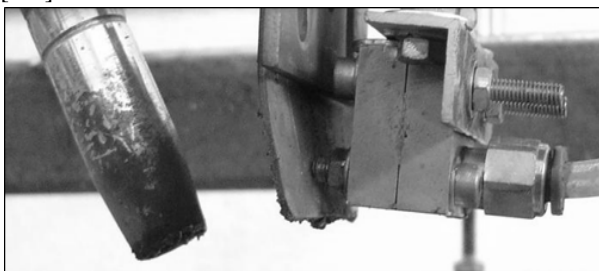
1. Technologia mikro-jetowa

Rozwój technologii spawania w produkcji jednostkowej podąża w kierunku [1, 4]:

- skrócenia czasu trwania procesu, np. zwiększenie szybkości spawania w pojedynczym przejściu,
- uzyskania jak najwyższych zawartości ferrytu drobnoziarnistego niskostopowym stalowym złączu.

Najważniejsze procesy spawalnicze stosowane w odpowiedzialnych konstrukcjach stalowych to metody spawalnicze typu: MIG, MAG, TIG, spawanie laserowe, spawanie łukiem krytym i elektrodami otulonymi [5-6]. Żadna z prezentowanych technologii nie daje możliwości precyzyjnego, selektywnego i lokalnego chłodzenia, a przez to uzyskiwania spoin o bardzo dużej zawartości ferrytu drobnoziarnistego pow. 50% przy równoczesnej redukcji naprężeń spawalniczych [6-8].

Dąży się do tego, aby w końcowym etapie spawania odpowiedzialne konstrukcje stalowe posiadały wysoką wytrzymałość i udurowienie. Możliwości takie zapewnia innowacyjna technologia spawania z chłodzeniem mikro-jetowym (rys. 1). Zaletą opracowywanej technologii jest możliwość podłączenia



Rys. 1. Ustawienie inżektora mikro-jetowego [1]

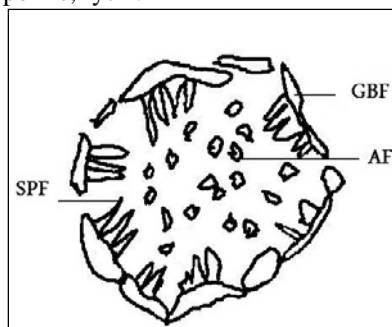
inżektora mikro-jetowego do istniejących stanowisk spawalniczych, przez co diametralnie

polepsza się właściwości uzyskiwanych połączeń. Pociąga to za sobą automatyczne podwyższenie jakości produktowej jako pochodnej wzrostu jakości procesowej. Nowa technologia daje praktyczną możliwość sterowania strukturą spoiny w warunkach przemysłowych, co potwierdziły wstępne wyniki badań [1].

Jakość procesu wywołuje wzrost jakości produktu końcowego (wysoka udamność niskostopowego stalowego złącza w ujemnych temperaturach, redukcję niepożądanych naprężeń, wzrost ilości ferrytu drobnoziarnistego w spoinie, rys 2.

Zachowanie właściwej geometrii konstrukcji i uzyskanie jak najniższego współczynnika odkształcenia na całej długości konstrukcji wielkogabarytowych jest zadaniem niezwykle istotnym, gdyż wiąże się z bezpieczeństwem ich eksploatacji. Zachowanie obostrzonych rygorów, szczególnie dla odpowiedzialnych konstrukcji jest niezwykle do osiągnięcia przy spawaniu konwencjonalnymi procesami spawalniczymi. W tym zakresie nowa technologia umożliwia spełnienie obostrzonych wymagań jakościowych stawianych wyżej wymienionym konstrukcjom stalowym (dodatkowo istotnie podwyższa własności mechaniczne złącza spawanego, w zakresie następujących parametrów: podatności na odkształcenia trwałe, wzrost udamności i odporności na pęknięcie).

Innowacyjność procesowa polega na włączeniu do istniejących metod spawania precyzyjnego, selektywnego i lokalnego chłodzenia, w wyniku którego możliwe jest sterowanie strukturą spoiny w zakresie uzyskania żądanej zawartości ferrytu AF, w ilości wyższej, nieosiągalnej w innych spawalniczych procesach oraz rozdrobnienie ziarna.



Rys. 2. Struktura metalograficzna typowego złącza ze stali niskostopowej, gdzie:
– AF– drobnoziarnisty ferryt (acicular ferrite),
– GBF – gruboziarnisty ferryt (grain boundary ferrite),
– SPF – gruboziarnisty ferryt (side plate ferrite) [1].

2. Cel i zakres

Głównym celem artykułu jest przedstawienie wybranych wyników badań zastosowania innowacyjnej technologii spawania przy użyciu chłodzenia mikro-jetowego dla łączenia wielkogabarytowych konstrukcji stalowych, na przykładzie ram pojazdów ciężarowych. Artykuł stanowi kontynuację badań prezentowanych w [9] i dotyczy wykorzystania mikro-jetu w spawaniu laserowym. Technologia zapewnia wysoką jakość połączenia spawanego poprzez chłodzenie mikro-jetowe co pozwala sterować strukturą spoiny.

Założono, że zastosowane rozwiązanie wpłynie bardzo korzystnie na redukcję naprężeń w spawanych wielkogabarytowych stalowych ramach ciężarówek, zapewni utrzymanie pożądanej geometrii spawanych konstrukcji i pozwoli uniknąć niepożądanych odkształceń spawalniczych. W rezultacie otrzyma się produkt o najwyższych wartościach użytkowych i wysokiej jakości rynkowej. Dodatkowo przewidywane niskie koszty wprowadzenia metody uzasadniają celowość podjętych badań. Mikro-jetowe inżektory mogą być zastosowane w istniejących ciągach technologicznych jako dodatkowe oprzyrządowania stanowiące rozwinięcie dotychczas stosowanych procesów spawalniczych. Nie wymuszają one całkowitej wymiany dotychczas stosowanego sprzętu.

Zakres badań obejmuje:

- opracowanie koncepcji materiałowo-technologicznej wytwarzania złączy spawanych ram opadowych z wymuszonym chłodzeniem,
- opracowanie założeń i skonstruowanie przystawek typu mikro-jet dla spawania ramy pojazdu ciężarowego,
- wytworzenie spoin metodami klasycznymi (MAG i laser) i metodą z zastosowaniem wymuszonego, precyzyjnego lokalnego chłodzenia mikro-jetowego
- określenie makro i mikrostruktury otrzymywanych powyższymi metodami , w tym ocenienie zawartości drobnoziarnistego ferrytu w spoinie stosując tzw. technikę „siatkową” zgodnie z wytycznymi Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa, podanymi w dokumencie MIS-IX-1323-84. (metoda LM),
- ocenę wielkości ujawnionych wtrąceń niemetalicznych- na przelomach (metoda SEM),
- określenie składu chemicznego wytworzonych spoin przy użyciu metod rentgenowskich (metoda SEM i EDX),
- określenie wybranych właściwości mechanicznych otrzymanych złączy:
- pomiar twardości (metodą Vickersa),
- próby udarności stopiw – (metoda wg normy: PN-EN 10045-1 oraz PN-EN 79 H-04371),
- próby rozciągania stopiw – (metoda wg. normy PN-EN 1000-1:2004, przygotowanie próbek wg normy PN EN 76/H 04326).

3. Wyniki badań

Postanowiono sprawdzić nowy proces spawalniczy (spawanie z chłodzeniem mikro-jetowym) w warunkach przemysłowych dla ramy pojazdu ciężarowego. Większa część konstrukcji była wykonana ze stali niskostopowej (S355J2G3) 18G2A. Do badań wytypowano następujące parametry spawalnicze (MAG + laser), (tabela 1, 2):

Tab. 1. Parametry podczas spawania ramy pojazdu ciężarowego (metoda MAG)

Nr	Parametr	Wartość
1.	Średnica drutu	1,2 mm
2.	Natężenie prądu	220 A
3.	Napięcie łuku	24 V
4.	Gaz ochronny w metodzie MAG	90% Ar – 10% CO ₂
5.	Gaz do chłodzenia mikro-jetowego	90% Ar – 10% CO ₂
6.	Ciśnienie mikro-strugi	0,5 MPa
7.	Średnica mikro-strugi	50 μm
8.	Ilość chłodzących mikro-strug	1

Chłodzenie mikro-jetowe nie ma większego wpływu na skład chemiczny spoiny (tablica 3). Największe różnice mogą stwierdzić w zawartości tlenu w stopiwie. Zawartość tlenu w stopiwie wzrasta po schładzaniu mieszanką Ar-CO₂ z 350 ppm do maksymalnie 400 ppm.

Tab. 2. Parametry podczas spawania ramy pojazdu ciężarowego (spawanie laserowe)

Nr	Parametr	Wartość
1.	Moc wiązki laserowej	2,2 kW
2.	Prędkość spawania	1,2 m/min
3.	Średnica ogniska wiązki laserowej	200 μm
4.	Długość ogniskowa	200 mm
5.	Gaz do chłodzenia mikro-jetowego	90% Ar – 10% CO ₂
6.	Ciśnienie mikro-strugi	0,5 MPa
7.	Średnica mikro-strugi	50 μm
8.	Ilość chłodzących mikro-strug	1

Tab. 3. Skład chemiczny spoiny po spawaniu ramy pojazdu ciężarowego ze stali S355J2G3

Nr	Pierwiastek	Zawartość w stopiwie
1.	C	0,08%
2.	Mn	0,77%
3.	Si	0,39%
4.	P	0,016%
5.	S	0,017%
6.	O	350 ppm

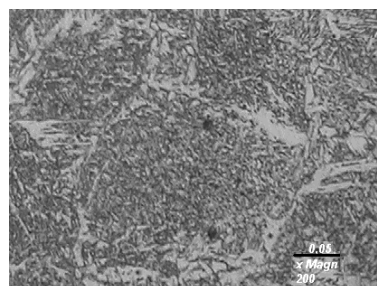
Po spawaniu ramy pojazdu ciężarowego z wykorzystaniem chłodzenia mikro-jetowego przekonano się, że nowa metoda spawalnicza pozwala na skrócenie procesu produkcyjnego (dotyczy to wszystkich operacji). Przy spawaniu ramy opadowej metodą MIG w porównaniu z metodą wykorzystującą chłodzenie mikro-jetowe czas produkcji jest prawie dwukrotnie wyższy. Różnica ta wynika nie tyle z samej operacji spawania (krótsze czasy przejść pomiędzy poszczególnymi ściegami dla metody z precyzyjnym chłodzeniem), ile z możliwości wyeliminowania zbędnych operacji, np.: prostowania ramy po procesie spawania z chłodzeniem mikro-jetowym. Już na tym etapie obserwacji, można stwierdzić, że wynika to z podwyższonej sztywności konstrukcji po spawaniu przy użyciu chłodzenia lokalnego i zredukowania niepożądanych naprężeń spawalniczych. Przy zastosowaniu pojedynczej mikro-dyszy chłodzącej spoinę mieszaną argonu z dwutlenkiem węgla o średnicy 50 μm czas chłodzenia $t_{8/5}$ (schładzanie spoiny z temp. 800 °C do temp 500 °C) wynosił ok. 14 sek. (rys.1), podczas gdy w standardowej metodzie MAG (bez chłodzenia mikro-jetowego) dla tego samego złącza wynosił 16 sekund, a po spawaniu laserowym wynosił 15 sekund. Te małe różnice w czasie $t_{8/5}$ w selektywnym chłodzeniu spawanego złącza ze stali niskowęglowej i niskostopowej sprawiają, że nie powstają niepożądane struktury hartownicze (typu bainit, martenzyt), natomiast ferryt może być znacząco rozdrobniony (rys 2).

Szybkie i precyzyjne chłodzenie wpłynęło przede wszystkim na strukturę uzyskiwanego złącza spawanego. Wyniki badań struktury złączy uzyskanych klasyczną metodą oraz metodą innowacyjną z chłodzeniem selektywnym przy pomocy chłodzenia mikro-jetowego zaprezentowano na rys. 3 i tablicy 4. Wyniki wskazują na wyższą zawartość ferrytu AF (drobnoziarnistego) w spoinach uzyskanych nowoczesną metodą. 50 μ m.

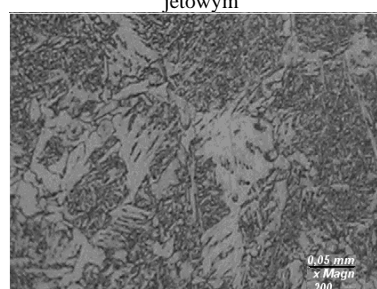
Tab. 4. Zawartość ferrytu AF w stopiwie [%].

Proces spawalniczy	AF, %	GBF, %	SPF, %	Pozostała struktura*
Spawanie klasyczne – MAG	45	20	30	5
Spawanie laserowe	55	15	25	5
Spawanie MAG z chłodzeniem mikro-jet	65	20	10	5
Spawanie laserowe z chłodzeniem mikro-jet	70	20	15	5

* (głównie fazy MAC: (martenzyt, austenit szczałkowy, węgliki),



Spawanie laserowe z chłodzeniem mikro-jetowym



Spawanie laserowe bez chłodzenia mikro-jetowego

Rys. 3. Drobnoziarnisty ferryt w spoinie po chłodzeniu mikro-jetowym (65%) i bez chłodzenia mikro-jetowego (45%)

Analiza danych zawartych w tablicy 4, pozwala stwierdzić, że w przypadku spawania klasycznego ramy pojazdu ciężarowego, ilość drobnoziarnistego ferrytu AF w spoinie oceniono na 45%. Spawanie laserowe pozwala na znacznie podniesienie zawartości ferrytu AF w stopiwie. W przypadku spawania ramy pojazdu ciężarowego metodą MAG z precyzyjnym chłodzeniem mikro-jetowym uzyskano w spoinie dużo większą zawartość ferrytu AF na poziomie 65%. W przypadku spawania ramy pojazdu ciężarowego metodą laserową z precyzyjnym chłodzeniem mikro-jetowym uzyskano w spoinie dużo większą zawartość ferrytu AF na poziomie 70%.

Tab. 5. Pomiary twardości złączy spawanych (HV-30)

Proces spawalniczy	MR (materiał rodzimy)	S (spoina)	SWC (strefa wpływu ciepła)
Spawanie klasyczne MAG	260	300	320
Spawanie MAG z chłodzeniem mikro-jetowym	260	310	320
Spawanie laserowe	260	310	325
Spawanie laserowe z chłodzeniem mikro-jetowym	260	315	330

Wyniki potwierdziły, że lokalne i selektywne chłodzenie sprzyja formowaniu drobnoziarnistego ferrytu, najkorzystniejszej fazy gwarantującej dobre właściwości plastyczne złączy. Uzyskana struktura wpłynęła korzystnie na właściwości użytkowe spoin. Potwierdzają to wyniki badań twardości (tablica 5) i udarności w ujemnych temperaturach (tablica 6).

Tab. 6. Pomiar udarności spoin, KV

Proces spawalniczy	-50 ⁰ C, KV, J	-40 ⁰ C, KV, J	-30 ⁰ C, KV, J	-20 ⁰ C, KV, J
Spawanie klasyczne MAG	poniżej 47	poniżej 47	poniżej 47	51
Spawanie MAG z chłodzeniem mikro-jetowym	poniżej 47	52	64	71
Spawanie laserowe	poniżej 47	poniżej 47	48	66
Spawanie laserowe z chłodzeniem mikro-jetowym	48	69	71	88

Analiza wyników przedstawionych w tablicach 5 i 6 pozwala stwierdzić, że dla tych samych warunków spawania uzyskano porównywalne wartości twardości, ale całkowicie odmienne udarności połączeń w zależności od doboru metody spawalniczej. Połączenia te charakteryzowały się nieco wyższą twardością w spoinie (ze względu na rozdrobnienie ziarna). Wyniki jednoznacznie wskazują, że nastąpiło znaczne podwyższenie klasy udarności połączeń spawanych uzyskanych w wyniku zastosowania innowacyjnej technologii spawania z chłodzeniem mikro-jetowym w porównaniu do metody klasycznej. W przypadku zastosowania chłodzenia mikro-jetowego po spawaniu metodą MAG uzyskano 4 klasę udarności (minimum 47 J w temp -40⁰ C). W przypadku zastosowania chłodzenia mikro-jetowego po spawaniu metodą laserową uzyskano 5 klasę udarności (minimum 47 J w temp -50⁰ C).

3. Podsumowanie i wnioski

Analiza przedstawionych wyników badań pozwala jednoznacznie stwierdzić, że: zastosowanie nowoczesnej technologii wykorzystującej chłodzenie precyzyjne (selektywne i lokalne) spoin w procesach spawalniczych umożliwia:

- sterowanie strukturą złączy, co potwierdziły wyniki badań zawartości ferrytu AF, SPF i GBF w otrzymanywanych złączach
- znaczne podwyższenie własności plastycznych złączy.

Technologia mikro-jetowa zastosowana do spawania ram pojazdów ciężarowych, w porównaniu do metody MAG (2 klasa udarności) pozwoliła uzyskać złącze o wysokiej 4 klasie udarności.

Technologia mikro-jetowa w spawaniu laserowym zastosowana do spawania ram pojazdów ciężarowych, w porównaniu do klasycznej metody (3 klasa udarności) pozwoliła uzyskać złącze o bardzo wysokiej 5 klasie udarności.

Można zatem wnioskować, że w wyniku zastosowania innowacyjnej technologii spawania i wzrostu właściwości użytkowych spawanej konstrukcji, nastąpił wzrost bezpieczeństwa jej eksploatacji i racjonalnej ergonomii obsługi. Przewiduje się około dwukrotne wydłużenie żywotności konstrukcji. Innowacyjna technologia spawania z chłodzeniem precyzyjnym,

pozwala zatem na zachowanie właściwej geometrii konstrukcji spawanych w wyniku obniżenia naprężeń spawalniczych w wykonanej konstrukcji, przy jednoczesnym zachowaniu wysokich właściwości jakości połączeń. Spełnienie powyższych wymagań szczególnie dla odpowiedzialnych elementów konstrukcyjnych wielkogabarytowych jest niezwykle trudne i czasem niemożliwe do osiągnięcia przy spawaniu konwencjonalnymi, procesami spawalniczymi. W tym zakresie prezentowana technologia pozwala nie tylko na znaczną poprawę właściwości uzyskiwanych produktów, ale również na zachowanie odpowiedniej dynamiki procesu, a wręcz jego skrócenie.

Literatura

1. Wegrzyn, T.; Piwnik, J.; Hadryś, D.: Oxygen in steel WMD after welding with micro-jet cooling ; Archives of metallurgy and materials, Volume: 58 Issue: 4 Pages: 1067-1070 Published: 2013
2. Wegrzyn, T.; Piwnik, J.; Łazarz B., Hadrys, Main micro-jet cooling gases for steel welding , archives of metallurgy and materials Volume: 58 Issue: 2, 2013, Pages: 556-559.
3. Lisiecki A. : Diode laser welding of high yield steel. Proc. of SPIE Vol. 8703, Laser Technology 2012: Applications of Lasers, 87030S (January 22, 2013), DOI: 10.1117/12.2013429
4. Burdzik R., Stanik Z., Warczek J., Method of assessing the impact of material properties on the propagation of vibrations excited with a single force impulse, Archives of Metallurgy and Materials 57 (2), 409-416
5. Lukaszowicz K., A. Kriz, J. Sondor: Structure and adhesion of thin coatings deposited by PVD technology on the X6CrNiMoTi17-12-2 and X40 CrMoV5-1 steel substrates, Archives of Materials Science and Engineering, 51 (2011), 40-47
6. Golański G., Gawień P., Słania J., Examination of Coil Pipe Butt Joint Made of 7CrMoVTib10 - 10(T24) Steel After Service, Archives of Metallurgy and Materials , vol. 57, issue 2, 2012,
7. Szczucka-Lasota B., Formanek B., Hernas A., Szymański K.: Oxidation models of the growth of corrosion products on the intermetallic coatings strengthened by a fine dispersive Al₂O₃. Journal of Materials Processing Technology, volumes 164-165, 2005, 935 – 939.
8. Bąkowski H., Posmyk A., Krawczyk J.: Tribological properties of rail steel in straight moderately loaded section of railway trucks. Archives of Metallurgy and Materials. Vol. 56 (3) 2011, 813-822.
9. Knosala R., Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji, Tom 1, Oficyna Wydawnicza Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2016, 220-228

Prof. dr hab. inż. Tomasz WĘGRZYN
Wydział Transportu
Politechnika Śląska
40-019 Katowice
ul. Krasińskiego 8
tel. 504816362,
e-mail: tomasz.wegrzyn@polsl.pl

Prof. zw. dr hab. inż. Jan Piwnik
Wydział Mechaniczny
Politechnika Białostocka
15-351 Białystok
ul. Wiejska 45c
Tel. 516765210,
e-mail: j.piwnik@pb.edu.pl

Mgr inż. Paweł KULAK
Mgr inż. Jacek JAWOR
LaserTec,
Tychy ul. Oświęcimska 321
e-mail: p.kulak@lasertec.pl
j.jawor@lasertec.pl

Dr inż. Bożena SZCZUCKA-LASOTA
Wyższa Szkoła Zarządzania Ochroną Pracy,
40-007 Katowice
ul. Bankowa 8
e-mail: bszcucka-lasota@wszop.edu.pl

Mgr Adam KONOPKA
Kofama Koźle. S.A.
47-205 Kędzierzyn Koźle
ul. Portowa 47
e-mail: adam.konopka@kofama.pl