

INNOWACYJNOŚĆ PROCESOWA I PRODUKTOWA W SPAWANIU WIELKOGABARYTOWYCH KONSTRUKCJI STAŁOWYCH – RAM OPADOWYCH

**Bożena SZCZUCKA-LASOTA, Adam KONOPKA, Tomasz WĘGRZYN,
Jan PIWNIK**

Streszczenie: Artykuł przedstawia zastosowanie nowej technologii spawania z mikro-jetowym chłodzeniem dla spawania wielkogabarytowych konstrukcji stalowych – ram opadowych. 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 udarność złączy spawanych w ujemnej temperaturze. Kolejną istotną zaletą procesu mikro-jetowego jest zmniejszenie spawalniczych naprężeń cieplnych w przestrzennych konstrukcjach stalowych.

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

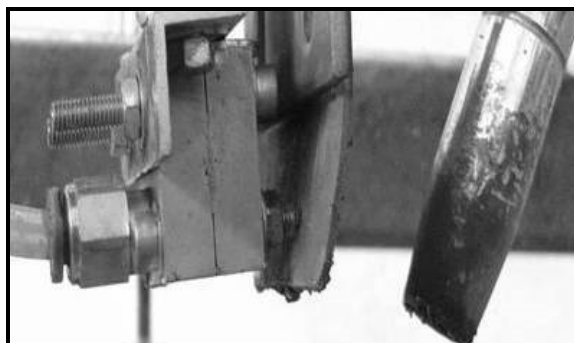
1. Technologia mikro-jetowa

Rozwój technologii spawania w produkcji jednostkowej podąża w kierunku:

- skrócenia czasu trwania procesu, np. zwiększenie szybkości spawania w pojedynczym przejściu, możliwości ograniczenia lub wyeliminowania potrzeby ukosowania złączy i.t.p.[1-6]
- regulacji właściwości termomechanicznych uzyskiwanych złączy, np. przy użyciu spray'ów [7]
- uzyskania jak najwyższych zawartości ferrytu drobnoziarnistego w złączu, ograniczenie ciepła pochodzącego z łuku spawalniczego (stosowanie dodatków stopowych, spawanie warstwowe) [1-11]

Obecne rozwiązania, dostępne na rynku polskim i europejskim to klasyczne metody spawalnicze typu: MIG, MAG, TIG oraz ich modyfikacje, typu: technologia K-TIG (opracowana przez Australian Government's Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation (CSIRO), ok. 100x szybsza od klasycznej technologii TIG) czy też. technologia A-TIG stosowana przez Instytut Spawalnictwa w Gliwicach), a także technologia spawania łukiem krytym [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. 60% przy równoczesnej redukcji naprężeń spawalniczych [5-9].

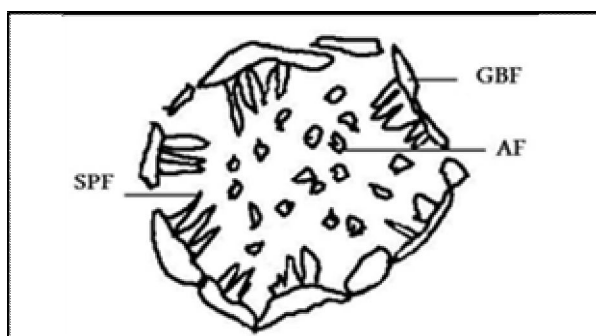
Dążąc, do tego, aby w końcowym etapie spawania wielkogabarytowych konstrukcji stalowych produkt charakteryzował się lepszą podatnością na odkształcenia trwałe, bez pękania, a zatem aby nastąpił wzrost bezpieczeństwa eksploatacji konstrukcji niezbędnym jest uzyskanie jak najniższych naprężeń spawalniczych, a także wzrost udarności uzyskiwanych złączy w temperaturze niskiej. Możliwości takie zapewnia innowacyjna technologia spawania micro-jetowego (rys. 1).



Rys. 1. Montaż injektora mikro-jetowego [1]

Zaletą opracowywanej technologii jest możliwość podłączenia instalacji iniektorów mikro-jetowych do istniejących niezuzłowych stanowisk spawalniczych, przez co diametralnie polepsza się właściwości uzyskiwanych połączeń.

W tej sytuacji pociąga to za sobą automatyczne podwyższenie jakości produktowej jako pochodnej wzrostu jakości procesowej. Nowa technologia daje praktyczną możliwość sterowania strukturą zarówno spoiny jak i napoiny w warunkach przemysłowych, co potwierdziły wstępne wyniki badań [1]. Jest to rodzaj dodatniego sprzężenia procesowo-technologicznego. Jakość procesu wywołuje wzrost jakości produktu końcowego (wzrost udarności w temperaturach niskich uzyskiwanych złączy spawanych ze stali niskostopowej, redukcję niepożądanych naprężeń, wzrost ilości ferrytu drobnoziarnistego w spoinie, rys 2.



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].

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 ostrych rygorów, szczególnie dla odpowiedzialnych elementów np. ram opadowych jest niezwykle trudne a czasem niemożliwe do osiągnięcia przy spawaniu konwencjonalnymi, niezuzłowymi technologiami spawalniczymi. W tym zakresie nowa technologia umożliwia spełnienie ostrych wymagań jakościowych stawianych wyżej wymienionym konstrukcjom stalowym (dodatkowo istotnie podwyższa własności mechaniczne złącza spawanego, w zakresie następujących parametrów: podatności na

odkształcenia trwałe, wzrost udarności i odporności na pękanie).

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.

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 spawanych ram opadowych. Technologia zapewnia wysoką jakość połączenia spawanego poprzez lokalne, selektywne, precyzyjne sterowanie strukturą spoiny.

Założono, że zastosowane rozwiązanie wpłynie bardzo korzystnie na redukcję naprężeń w spawanych wielkogabarytowych stalowych ramach opadowych, 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 metod. Nie wymuszają całkowitej wymiany dotychczas stosowanego sprzętu.

Zakres badań prezentowanych w artykule obejmuje:

- analizę literatury zagadnienia,
- opracowanie koncepcji materiałowo-technologicznej wytwarzania złączy spawanych ram opadowych z wymuszonym chłodzeniem,
- opracowanie założeń i skonstruowanie przystawki typu mikro-jet dla spawania ramy opadowej,
- wytworzenie spoin metodą z zastosowaniem wymuszonego, precyzyjnego lokalnego chłodzenia mikro-inżektorem (A50)
- określenie makro i mikrostruktury otrzymywanych spoin 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),
- określenie wybranych właściwości mechanicznych otrzymanych złączy:
 - pomiar twardości (metoda Vickersa),
 - próby udarności stopiw – (metoda wg normy: PN-EN 10045-1 oraz PN-EN 79 H-04371),

3. Wyniki badań

Postanowiono sprawdzić nowy proces spawalniczy (spawanie z chłodzeniem mikro-jetowym) w warunkach przemysłowych dla wielkogabarytowej konstrukcji typu rama opadowa. Większa część konstrukcji była wykonana ze stali niskostopowej (S355J2G3) 18G2A. Do badań wytypowano następujące parametry spawalnicze (tab. 1):

Po spawaniu ramy opadowej z wykorzystaniem chłodzenia mikro-jetowego przekonano się, że nowa metoda spawalnicza pozwala na wyraźne skrócenie procesu produkcyjnego (dotyczy to wszystkich operacji, zwłaszcza podgrzewania wstępnego). 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 chodzeniem), ile z możliwości wyeliminowania zbędnych operacji: podgrzewania wstępnego czy 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 argonem o średnicy 50 μm czas chłodzenia $t_{8/5}$ (schładzanie spoiny z temp. 800 $^{\circ}\text{C}$ do temp 500 $^{\circ}\text{C}$) wyniósł ok. 14 sek., podczas gdy w standardowej metodzie MIG (bez chłodzenia mikro-jetowego) dla tego samego złącza wyniósł 16 sek. 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, fazy MAC), natomiast ferryt może być znacząco rozdrobniony (rys 2).

Tab. 1. Parametry podczas spawania ramy opadowej

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

Chłodzenie mikro-jetowe nie ma wpływu na skład chemiczny spoiny (tablica 2).

Tab. 2. Skład chemiczny spoiny po spawaniu ramy opadowej wykonanej głównie ze stali S355J2G3

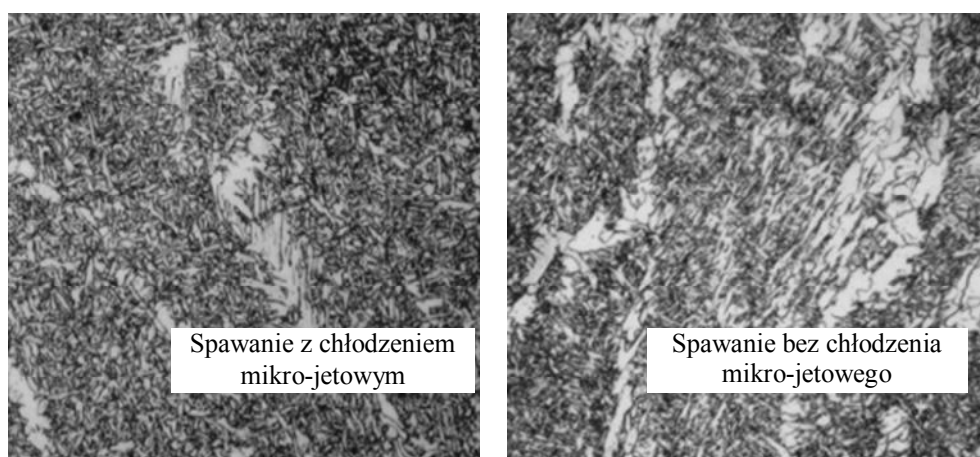
Nr	Pierwiastek	Zawartość
1.	C	0,08%
2.	Mn	0,77%
3.	Si	0,39%
4.	P	0,016%
5.	S	0,017%

Wyniki badań strzałki ugięcia pozwalają stwierdzić, że dla 16 m długości konstrukcji spawanej ze stali niskostopowej 18G2A metodą klasyczną uzyskano wartość 5 cm, z kolei spawanie innowacyjną metodą z chłodzeniem mikro-jetowym zapewniło wartość strzałki ugięcia na dużo niższym poziomie (nawet nie przekraczającym wartości 1,5 cm). Prezentowane wyniki potwierdziły wcześniejszą obserwację.

Można zatem wnioskować, że nastąpiło poprawienie sztywności konstrukcji w wyniku

zastosowania spawania z selektywnym, precyzyjnym chłodzeniem mikro-jetowym, gdyż uzyskano wyraźne zmniejszenie strzałki ugięcia o ponad 50 %.

Szybkie i precyzyjne chłodzenie wpłynęło również 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 tab. 3. Wyniki wskazują na wyższą zawartość ferrytu AF (drobnoziarnistego) w spoinach uzyskanych nowoczesną metodą.



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

Tab. 3. Zawartość ferrytu AF w stopiwie [%]

Proces spawalniczy	AF, %	GB, %	SPF, %	Pozostała struktura (głównie fazy MAC: (martenzyt, austenit szczątkowy, węgliki),
Spawanie klasyczne – MIG (w argonie)	45	20	30	5
Spawanie z chłodzeniem precyzyjnym przy pomocy mikro-jeta	65	20	10	5

Analiza danych zawartych w tabeli 3, pozwala stwierdzić, że w przypadku spawania klasycznego ramy opadowej, ilość drobnoziarnistego ferrytu AF w spoinie oceniono na 45%. W przypadku spawania ramy opadowej z precyzyjnym chłodzeniem mikro-jetowym uzyskano w spoinie dużo większą zawartość ferrytu AF na poziomie 65%. Wyniki potwierdziły, że lokalne i selektywne chłodzenie sprzyjało formowaniu drobnoziarnistego ferrytu, najkorzystniejszej fazy gwarantującej dobre własności plastyczne złącza.

Porównując wyniki badań stopiwa uzyskanego podczas spawania metodą klasyczną z metodą wykorzystującą chłodzenie mikro-jetowe można stwierdzić, że nowoczesna metoda zapewnia uzyskanie struktury o znacząco wyższej zawartości ferrytu AF. Już użycie

jednodyszowej przystawki (A50) zapewniło uzyskanie bardzo dużej ilości fazy ferrytu AF (65% przy chłodzeniu argonem). Można przypuszczać, że zastosowanie większej ilości mikro-dysz przyspieszy proces chłodzenia, ale nie powinno to wpłynąć na dalsze rozdrobnienie ferrytu. Uzyskana struktura wpłynęła korzystnie na właściwości użytkowe spoin. Potwierdzają to wyniki badań twardości (tab. 4) i udarności w ujemnych temperaturach (tab. 5).

Tab. 4. Pomiary twardości złączy spawanych (HV-30)

Proces spawalniczy:	Średnia wartość z pięciu pomiarów:		
	MR (materiał rodzimy)	S (spoina)	SWC (strefa wpływu ciepła)
Spawanie klasyczne MIG	260	300	320
Spawanie MIG z chłodzeniem precyzyjnym przy pomocy mikro-injektora	260	310	320

Tab. 5. Pomiar udarności spoin, KV

Proces spawalniczy:	Średnia wartość z trzech pomiarów			Klasa udarności:
	-40 ⁰ C, KV, J	-30 ⁰ C, KV, J	-20 ⁰ C, KV, J	
Spawanie klasyczne MIG	poniżej 47	poniżej 47	51	2
Spawanie MIG z chłodzeniem precyzyjnym przy pomocy chłodzenia mikro-jetowego	52	64	71	4

Analiza wyników przedstawionych w tabeli 4-5 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.

4. 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 otrzymanyach złączach
- znaczne ograniczenie naprężeń cieplnych powstających w procesie spawania

- uniknięcie niepożądanych odkształceń spawalniczych w spawanych ramach opadowych, przy zachowaniu normatywnych kształtów i wymiarów, co potwierdziły wyniki sztywności konstrukcji i uzyskana wartość strzałki ugięcia w porównaniu do ram spawanych metodami tradycyjnymi.

Nowa technologia zastosowana do spawania ram opadowych, w porównaniu do metody MIG pozwoliła uzyskać poprawienie sztywności (zmniejszenie strzałki ugięcia o 50 %)

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, niezuzłowymi 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. Zastosowanie nowoczesnego rozwiązania w postaci rodziny przystawek mikro-jetowych, dotychczas nie stosowanych w procesach spawalniczych zarówno w Polsce, jak i na świecie, zapewniło wysokoprecyzyjne chłodzenie, którego wymiernym efektem jest zmniejszenie naprężeń i wyeliminowanie czynności podgrzewania i przegrzania konstrukcji opadowych w ciągu technologicznym.

Literatura

1. Węgrzyn T., Piwnik, J., Hadryś, D.: Oxygen in steel WMD after welding with micro-jet cooling. Archives of metallurgy and materials, 58, 4, 2013, 1067-1070.
2. Węgrzyn, T., Piwnik, J., Łazarz B., Hadrys D.: Main micro-jet cooling gases for steel welding. Archives of metallurgy and materials, 58, 2, 2013, 556-559.
3. Lisiecki A.: Diode laser welding of high yield steel. Proc. of SPIE Vol. 8703, Laser Technology 2012: Applications of Lasers, 87030S, 22 January 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, 2012, 409-416.
5. Oi K., Murayama M.: Recent Trend of Welding Technology Development and Applications. JFE Technical Report, no 20, 2015, 77-84.
6. <http://innovativewelding.com.au/products>, (dostęp. dn. 20.12.2015).
7. Rodrigues C., Barata J., Silva A.: Spray impingement modelling: Evaluation of the dissipative energy loss and influence of an enhanced near-wall treatment. Fuel Processing Technology, 107, 2013, 71-80.
8. Łukaszkołowicz K., Kriz A., Sondor J.: 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.
9. 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, 57, 2, 2012, 553-557.

10. Tarasiuk W., Szczucka-Lasota B, Piwnik J., Majewski W.: Tribological properties of super field weld with micro-jet process. *Advanced Materials Research, Modern Technologies in Industrial Engineering II*, 1036, 2014, 452-457.
11. Bąkowski H., Posmyk A., Krawczyk J.: Tribological properties of rail steel in straight moderately loaded section of railway trucks. *Archives of Metallurgy and Materials*, 56, 3, 2011, 813-822.

Dr inż. Bożena SZCZUCKA-LASOTA
Katedra Podstaw Techniki i Jakości
Wyższa Szkoła Zarządzania Ochroną Pracy w Katowicach
40-019 Katowice, ul. Bankowa 8
tel. 606-885-808,
e-mail: bszczucka-lasota@wszop.edu.pl

Mgr Adam KONOPKA
Kofama Koźle SA,
47-205 Kędzierzyn-Koźle, ul. Portowa 47
tel. 77 446 11 40,
e-mail: adam.konopka@kofama.pl

Prof. nzw. 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