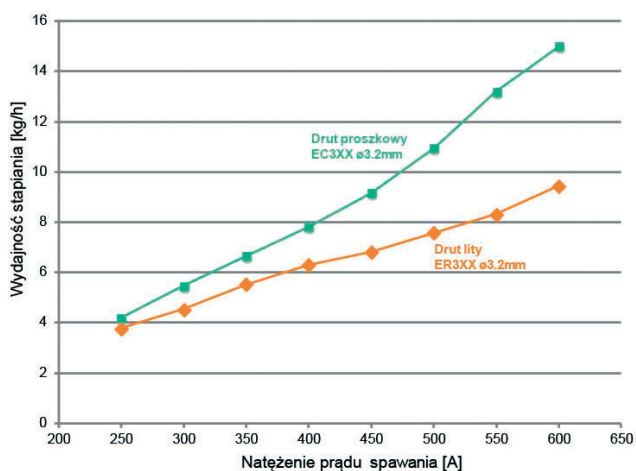


# Spawanie łukiem krytym drutami proszkowymi: spawanie i napawanie stali wysokostopowych

Bastien Gerard

Spawanie łukiem krytym może być prowadzone przy użyciu elektrodowych drutów litych (najczęściej stosowanych) oraz proszkowych. W szeregu przypadkach użycie drutów proszkowych (proces 125 wg PN-EN ISO 4063:2011 - przyp. red.) może być korzystniejsze od użycia drutów litych (proces 121). Druty proszkowe składają się z metalowej osłony (rurka) oraz rdzenia zawierającego mieszaninę proszków metalicznych i niemetalicznych. Podczas spawania drutem proszkowym cały lub prawie cały prąd jest przewodzony metalową rurką. Natomiast w przypadku drutu litego, prąd płynie całym jego przekrojem. Z tego powodu drut proszkowy z rdzeniem metalicznym ma dwie główne zalety:

- przy określonym natężeniu prądu drut proszkowy charakteryzuje się wyższą wydajnością stapiania (rys. 1),
- przy określonej wydajności stapiania proces spawania drutem proszkowym charakteryzuje się niższą ilością wprowadzanego ciepła.



Rys. 1. Wydajność stapiania - porównanie drutu proszkowego z drutem litym

Badania przeprowadzone w Grupie Welding Alloys wykazały, że właściwości drutów proszkowych gwarantują wysoką jakość spawania stali nierdzewnych austenitycznych i austenityczno-ferrytycznych.

• **Nierdzewne stale austenityczne i „superaustenityczne”** są stosunkowo łatwo spawalne. Zwykle nie wymagają wstępnego lub końcowego podgrzewania ani też obróbki cieplnej po spawaniu. Spoina/napoina austenityczna o zawartości ferrytu 3-10% jest odporna na pęknięcia gorące. Stale nierdzewne „superaustenityczne” są bardziej podatne na pęknięcia gorące i wymagają większej staranności podczas spawania. Stale te mają niższą przewodność cieplną niż standardowa stal niskowęglowa (C-Mn), co oznacza, że w strefie spawania będzie dłużej utrzymywać się wysoka temperatura. Podczas spawania, zanieczyszczenia mogą koncentrować się na granicach ziaren, zwiększając ryzyko pęknięć. Aby tego uniknąć, należy starannie dobrać warunki spawania, czyli:

- dbać o niski poziom zanieczyszczeń w spoinie/napoinie,
- kontrolować stopień wymieszania materiałów,
- zapewnić niską ilość wprowadzonego ciepła,
- temperatura międzyścięgowa nie powinna przekraczać 100-150°C.

Przy użyciu drutu proszkowego, spawanie może być prowadzone z niską ilością wprowadzonego ciepła, zapewniając jednakże wyższą wydajność niż w przypadku drutu litego. Tak więc druty proszkowe zapewniają wysoką jakość połączonej z wysoką wydajnością.

• **Stale austenityczno-ferrytyczne typu lean duplex, duplex i superduplex** cechują się w zasadzie bardzo dobrą spawalnością. Jednak aby zagwarantować dobry stan spoiny/napoiny, należy wziąć pod uwagę zawartość ferrytu. Zbyt duża jego zawartość (>65%) powoduje zmniejszenie odporności na korozję i plastyczności, w związku z czym ważna jest kontrola prędkości chłodzenia (nie powinno być zbyt intensywne), by uniknąć nadmiernego zwiększenia się udziału ferrytu w strukturze. Spawanie łukiem krytym odbywa się z dużą ilością wprowadzonego ciepła i dlatego może być stosowane do spawania tych stali.

W dalszej części artykułu omówiono zastosowanie drutów proszkowych o rdzeniu metalicznym do spawania połączeniowego i napawania łukiem krytym.

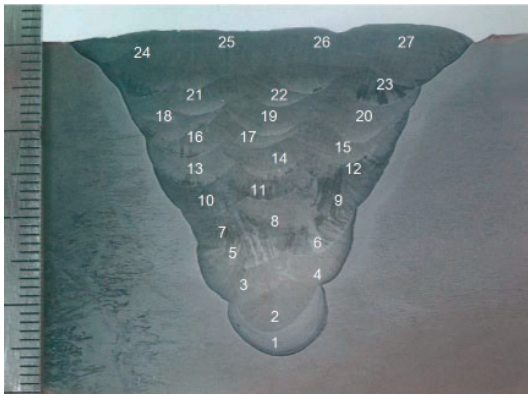
## Spawanie połączeniowe

Spawanie łukiem krytym jest powszechnie stosowane do wykonywania połączeń. Ze względu na ograniczenie spawania tą metodą w zasadzie tylko do pozycji podolnej i brak możliwości obserwacji jeziorka spawalniczego w trakcie spawania, metoda ta jest stosowana głównie do spawania zmechanizowanego lub automatycznego i czasem do zrobotyzowanego. Wymagania dotyczące wzrostu wydajności, niezawodności i jakości są nieubłagane i prowadzą do poszukiwania nowych technik i ich kombinacji. Znane są metody spawania nazywane „tandem”, „twin” (podwójny drut), „tandem-twin” (podwójny drut-tandem), wieloma drutami oraz ostatnio technika ICETM opracowana przez firmę ESAB. Jednak w każdym procesie metaliczny drut proszkowy przyczynia się do poprawy jakości i zwiększenia wydajności. Prosta zmiana materiału dodatkowego może przynieść dodatkowe korzyści, co ukazuje poniższa tablica, gdzie porównano osiągi drutu litego i proszkowego o rdzeniu metalicznym w tych samych warunkach spawania. Używając drutu proszkowego uzyskuje się wyższą wydajność podczas spawania wielościęgowego (tabl. 1, rys. 2, 3).

Tablica 1. Porównanie wydajności procesu spawania złącza doczołowego o grubości 35 mm, V 60°, łukiem krytym drutem litym (121) i proszkowym (125)

Proces spawania	Średnica [mm]	Natężenie prądu [A]	Napięcie łuku [V]	Prędkość spawania [cm/min]	Uzysk [%]	Liczba ścięgów	Wydajność [kg/godz]
121	3,2	450	31	50	99	27	6,2
125	3,2	450	31	50	97	22	7,6

Bastien Gerard (Welding Engineer - Fr IWE 00545) - Welding Alloys France SAS;



Rys. 2. Układ ściegów w rowku V 60°; grubość spoiny 35 mm, grubość blachy 50 mm; spawanie drutem litym ER309L  $\phi$  3,2 mm; 450 A; 31 V; 50 cm/min; 27 ściegów



Rys. 3. Układ ściegów w rowku V 60°; grubość spoiny 35 mm, grubość blachy 50 mm; drut proszkowy EC309L  $\phi$  3,2 mm; 450 A; 31 V; 50 cm/min; 22 ściegi

Dzięki szerokiemu zakresowi parametrów, drut proszkowy o rdzeniu metalicznym może być stosowany w procesach spawania łukiem krytym - od procesów dwuściegowych do wielościegowego wykonywania spoin czołowych.

### Napawanie

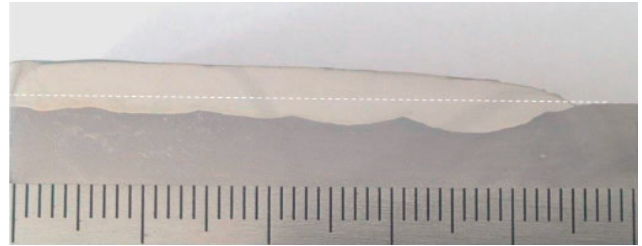
Napawanie stali nierdzewnych związane jest z kontrolą stopnia wymieszania napoiny z materiałem podstawowym. Do doboru materiału dodatkowego wykorzystywane są wykresy Schaeffler'a, Delong'a, Espy i WRC, co umożliwia określenie struktury napoiny. Im bliżej obszaru martenzytu na wykresie, tym większe ryzyko wystąpienia pęknięcia zimnego. Procedura kwalifikowania technologii napawania wg EN ISO 15614-7 & ASME IX przewiduje próby zginania w celu ujawnienia skłonności do pęknięcia i zagwarantowania wytrzymałości napoiny.

Obecnie do napawania jest szeroko stosowany proces elektrożuźlowy (ESW) ze względu na jego zalety - niskie wymieszanie, wysoką wydajność i małe odkształcenia. Jednak proces ten czasami może okazać się zbyt skomplikowany i niemożliwy do zastosowania z powodu:

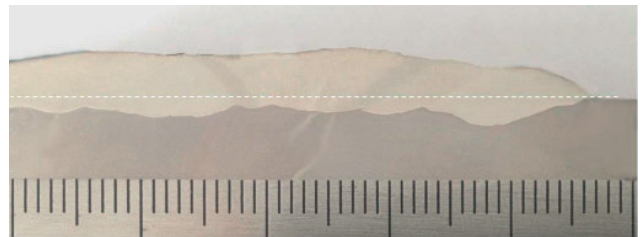
- utrudnień (szerokość taśmy + magnetyczny układ sterowania),
- wymagań co do minimalnej grubości materiału podstawowego - w przybliżeniu 1 szerokości taśmy (np. min. grubość materiału podstawowego - 30 mm, jeśli szerokość taśmy wynosi 60 mm),
- dużych odkształceń z powodu dużej ilości wprowadzonego ciepła,

- potrzeby stosowania spawalniczego źródła prądu zapewniającego wysokie natężenie prądu spawania, np. 1200 A dla taśmy o szerokości 60 mm.

Spawanie łukiem krytym jest jednym z najbardziej wydajnych procesów spawania. Ponieważ prąd jest przewodzony tylko przez rurkę, profil ściegu ułożonego z użyciem drutu proszkowego jest szerszy i mniej wtopiony niż przy użyciu drutu litego. Dlatego, przy tych samych parametrach (330 A; 30 V; 41 cm/min), proces spawania łukiem krytym z użyciem drutu proszkowego zapewnia mniejsze wymieszanie i mniejsze ryzyko tworzenia się martenzytu w strefie wpływu ciepła (wymieszanie 23 % w przypadku drutu proszkowego w porównaniu do 30 % w przypadku drutu litego) (rys. 4, 5).



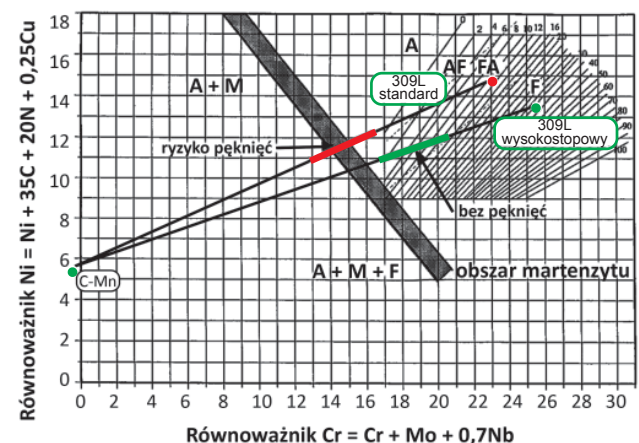
Rys. 4. Napawanie drutem litym ER309L  $\phi$  3,2 mm; 330 A; 30 V; 41 cm/min; stopień wymieszania ok. 30%



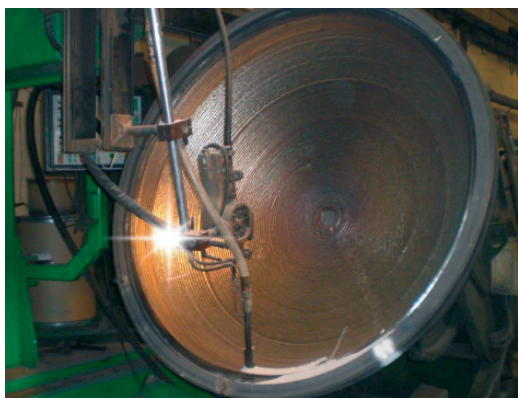
Rys. 5. Napawanie drutem proszkowym EC309L  $\phi$  3,2 mm; 330 A; 30 V; 41 cm/min; stopień wymieszania ok. 23%

Pomimo wysokiej wydajności oferowanej przez proces spawania łukiem krytym, rzadkie są przypadki zastosowania tego procesu do napawania z powodu wyższego stopnia wymieszania (nawet przy użyciu drutu proszkowego). Nie jest też możliwe zagwarantowanie stałej jakości z powodu prawdopodobnego tworzenia się martenzytu w strefie wpływu ciepła i powstawania pęknięć w czasie próby zginania.

Grupa Welding Alloys pokonała ten problem, opracowując nowy wysokostopowy drut proszkowy 309L przeznaczonego do napawania.



Rys. 6. Wykres WRC 1992 - obszar tolerancji wysokiego stopnia wymieszania



Rys. 7. Napawanie drutem proszkowym 309L + 308L dennicy ze stali 1,25% Cr- 0,5Mo

czony do wykonywania warstwy buforowej. Zwiększając zawartość chromu, możliwe jest odsunięcie się od granicy strefy martenzytu, zapewniając w ten sposób większą tolerancję na wymieszanie (>40%). Dzięki takiemu rozwiązaniu drutu 309L, otrzymuje się wymagany skład chemiczny w dwóch warstwach, bez ryzyka pęknięcia (rys. 6).

Użycie tego typu drutu proszkowego w procesie łuku krytego jako buforu uzupełnia gamę materiałów dodatkowych do napawania z wysoką wydajnością (rys. 7).

#### Uwagi dotyczące napawania warstw austenitycznych i duplex

Druty proszkowe nierdzewne, austenityczne i duplex do napawania łukiem krytym są zasadniczo wypełnione składnikami metalicznymi, chociaż w składzie rdzenia mogą znaleźć się również zasadowe składniki mineralne dla poprawienia jakości i wytrzymałości warstwy napawanej. Zainteresowanie nierdzewnymi drutami proszkowymi do napawania łukiem krytym nie wynika tylko z możliwości wykonania napoin o dowolnym składzie chemicznym, ale także z jakości, różnorodności zastosowania i wydajności.

- Korzyści można podsumować następująco:
- zwiększona wydajność stapiania w porównaniu z drutem litym,
  - mniejsze odkształcenia spawanych/napawanych konstrukcji z racji większych prędkości liniowych,
  - łatwa usuwalność żużla nie tylko przy napawaniu, ale i spawaniu połączeniowym,
  - szeroki zakres stosowania (pod względem parametrów) zarówno do spawania, jak i napawania.

Tego rodzaju druty proszkowe są niezwykle przydatne do wykonywania połączeń spawanych. Równocześnie, użycie drutu 309L jako podkładu (buforu) gwarantuje napoinę o wysokiej jakości i o niskiej zawartości węgla nawet na stalach konstrukcyjnych niestopowych lub niskostopowych.

#### Uwagi dotyczące napawania warstw superaustenitycznych

Superaustenityczne materiały dodatkowe dają w pełni niskowęglową napoinę austenityczną, o dobrej odporności na korozję w środowisku agresywnym. Dzięki ich wysokiemu wskaźnikowi odporności na korozję wżerową (PREN), materiały te zapewniają podwyższoną odporność na korozję zarówno ogólną, jak i miejscową, szczególnie w środowisku kwasu siarkowego, fosforowego oraz wody morskiej. W odróżnieniu od standardowych nierdzewnych stali austenitycznych, stale superaustenityczne (np. UNS N08904), dzięki wysokiej tolerancji na wymieszanie nie wymagają jakichś szczególnych warstw podkładowych.

#### Podsumowanie

Spawanie łukiem krytym zapewnia uniwersalność zarówno w przypadku spawania, jak i napawania, a także wyższą wydajność niż przy stosowaniu drutów litych.

Druty proszkowe przeznaczone do spawania i napawania łukiem krytym (tabl. 2) są dobrym uzupełnieniem drutów litych do spawania połączeniowego oraz taśm do napawania elektrożużłowego.

Tablica 2. Zestawienie wysokostopowych drutów proszkowych firmy Welding Alloys i właściwości mechanicznych stopiwa tych drutów

		EN ISO	ASME / AWS	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A5 [%]	KCV [J]
Austenityczne	TUBE S 309L-S	T 23 12 L M NO 3	EC309L	450	550	35	+20°C: 70
	TUBE S 309LMo-S	T 23 12 2 L M NO 3	EC309LMo	540	700	27	+20°C: 50
	TUBE S 309LNb-S	T 23 12 Nb M NO 3	EC309LNb	470	580	35	+20°C: 80
	TUBE S 309H-S	T Z 22 10 N H M NO 3	EC309L modyfik.	470	560	35	+20°C: 70
	TUBE S 308L-S	T 19 9 L M NO 3	EC308L	420	560	35	-196°C: 50
	TUBE S 308H-S	T Z 19 9 H M NO 3	EC308H	440	560	35	+20°C: 80
	TUBE S 20-9-3-S	T 20 10 3 M NO 3	EC308Mo	530	700	30	-40°C: 60
	TUBE S 347L-S	T 19 9 Nb M NO 3	EC347L	430	590	35	+20°C: 80
	TUBE S 347H-S	T 19 9 Nb M NO 3	EC347	460	640	35	+20°C: 70
	TUBE S 316L-S	T19 12 3 L M NO 3	EC316L	410	560	35	-101°C: 40
Superaustenityczne	TUBE S 318L-S	T19 12 3 Nb M NO 3	EC318L	450	620	32	+20°C: 80
	TUBE S 310-S	T 25 20 M NO 3	EC310	420	630	30	+20°C: 80
Duplex Superduplex	TUBE S 904L-S	T Z 20 25 5 Cu L M NO 3	EC385	350	560	30	-196°C: 70
	TUBE S 22-9-3L-S	T 22 9 3 N L M	EC 2209	630	800	28	-60°C: 50
	TUBE S D57L-S	T 25 9 4 Cu N L M	EC 2594	700	850	25	-50°C: 40



**Welding Alloys Polska Sp. z o.o.**

ul. Antonio Gaudiego 2

44-109 Gliwice, Poland

tel.: +48 32 226 02 75, fax: +48 32 226 02 76

[www.welding-alloys.com](http://www.welding-alloys.com)