

## **BADANIA JAKOŚCI BEZSZWOWYCH DRUTÓW PROSZKOWYCH**

**Opracował:**

**mgr inż. Adrian Wolski**

**Instytut Technologii Maszyn i Materiałów, Wydział Inżynierii  
Mechanicznej i Okrętownictwa, Politechnika Gdańska**



## **1. Wstęp**

Proces spawania drutami proszkowymi (FCAW) zyskuje coraz większą popularność w różnych dziedzinach przemysłu. Przemysł stoczniowy oraz offshore [1] znacznie częściej wykorzystuje tę metodę przy wykonywaniu odpowiedzialnych i masywnych konstrukcji, których nie można wykonać stosując metody w pełni zautomatyzowane, np. spawanie łukiem krytym. Wzrost zainteresowania tą metodą spowodowany jest przez wysoką wydajność procesu spawania, łatwość opanowania tej metody przez spawaczy, możliwości spawania szerokiego zakresu materiałów i fakt, że charakter tej metody sprzyja wytwarzaniu złączy dobrej jakości (pozbawionego wad) [2].

Wydajność procesu wynika z budowy materiału dodatkowego w postaci drutu elektrodowego składającego się z dwóch zasadniczych elementów: koszulki metalicznej, która może być miedziowana i sypkiego rdzenia w postaci proszku topnikowego, czy metalicznego. Kształt przekroju drutu powoduje zwiększenie wydajności spawania w porównaniu do tradycyjnego drutu litego. Prąd elektryczny jest przewodzony tylko przez koszulkę metalową, co przy mniejszym polu powierzchni przekroju poprzecznego, niż dla drutu litego, prowadzi do wzrostu gęstości prądu spawania i w konsekwencji do zwiększenia szybkości stapiania drutu elektrodowego.

Znaczna uniwersalność tej metody FCAW wynika z szerokiego zakresu spawanych materiałów. Opracowano materiały dodatkowe do spawania stali niskowęglowej, niskostopowej, wysokostopowej, do spawania stali energetycznych, stali nierdzewnych, stopów niklu oraz druty do napraw i regeneracji różnych materiałów (np. żeliw), czy materiały do napawiania utwardzającego metodą FCAW-S [3].

Natomiast jednym z głównych problemów używania metody FCAW do spawania konstrukcji jest higroskopijność rdzenia drutów [4]. Wilgoć pochłaniana z atmosfery może być przyczyną formowania się pęcherzy gazowych oraz pęknięć zimnych dyskwalifikujących konstrukcję z eksploatacji. Pęknięcia zimne spowodowane są jednoczesnym występowaniem trzech czynników: naprężeń pozostających, kruchej struktury oraz obecnością wodoru dyfundującego w stopiwiu. Nawodorowanie stopiwiu może być skutkiem dekompozycji wilgoci wynikającej z niewłaściwego przechowywania materiału dodatkowego do spawania. Producenci drutów przeciwdziałając tym zagrożeniom dostarczają wytycznych dotyczących przechowywania spoiw. Wytyczne te określają przedziały temperatury, zakresy wilgotności powietrza oraz zasady przechowywania opakowań z drutami.

Celem pracy była weryfikacja wpływu przechowywania bezszwowych drutów proszkowych do metody spawania FCAW w warunkach przemysłowych. W tym celu przechowywano trzy wybrane gatunki drutów na terenie przedsiębiorstwa w strefie przemysłowej w Elblągu (województwo warmińsko-mazurskie), a następnie wykonano badania metalograficzne i oznaczono ilość wodoru dyfundującego w stopiwiu. Wyniki porównano z wartościami uzyskanymi dla tych samych drutów w stanie dostawy.

## **2. Część badawcza**

### **2.1 Materiały do badań**

Do badania jakości bezszwowych drutów proszkowych wykorzystano trzy gatunki drutów, które oznaczono literami B, C i D. Wszystkie są drutami proszkowymi topnikowymi o wypełnieniu rutyłowym i średnicy 1,2 mm. Dodatkowo są to druty bezszwowe z warstwą miedzi na powierzchni walcowej. Według normy PN-EN ISO 17632 użyte druty posiadają następujące oznaczenia:

- Drut B: T 46 4 Z P M 1 H5
- Drut C: T 46 6 Z P M 2 H5
- Drut D: T 42 2 Z P M 1 H5

W tabeli 2.1 zamieszczono skład chemiczny stopiwa poszczególnych drutów.

Tab. 2.1. Skład chemiczny stopiwa

Rodzaj drutu	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cu [%]	Ni [%]
B	0,05	0,50	1,50	0,010	0,006	0,30	0,35
C	0,06	0,30	1,27	0,011	0,005	0,26	0,95
D	0,05	0,41	1,36	0,010	0,008	0,26	-

Otwarte szpule z drutami były magazynowane w Elblągu przez 88 dni (2.03.2018 r.– 28.05.2018 r.) w warunkach przemysłowych, w pobliżu kanału portowego. W czasie ekspozycji szpul dokonywana była rejestracja temperatury oraz wilgotności powietrza. W tabeli 2.2. zamieszczono skrajne i uśrednione wartości temperatury oraz wilgotności względnej powietrza panujące podczas okresu przechowywania.

Tab. 2.2. Warunki panujące podczas przechowywania badanych drutów proszkowych

	Minimalna	Maksymalna	Średnia
Temperatura [°C]	-9,5	35,2	10,4
Wilgotność względna [%]	23,1	100	67,5

## 2.2 Metodyka badań

Dla drutów w stanie dostawy i stanie po przechowywaniu wykonano badania metalograficzne mikroskopowe przekroju wzdłużnego i przekroju poprzecznego. Badania zrealizowano na mikroskopie metalograficznym przy powiększeniu od 50x do 500x. Druty do zglądów przekroju wzdłużnego zainkludowano na gorąco w żywicy fenylowej, a następnie szlifowano ręcznie na szlifierko-polerce z chłodzeniem wodą. Próbki do badań przekroju poprzecznego wykonano przez umieszczenie drutów w uchwycie metalowym do badań metalograficznych, a następnie delikatne wyszlifowanie w ten sam sposób jak przekroje wzdłużne. Nie zastosowano w żadnym z przypadków trawienia chemicznego.

Zrealizowano również badania mikroskopowe powierzchni zewnętrznej drutów za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM). W tym celu próbki zostały umieszczone na dedykowanej podkładce przedstawionej na rysunku 2.1. Następnie druty z podkładką umieszczono w komorze próżniowej mikroskopu. Próbki obserwowano przy powiększeniu od 70x do 1000x, w miejscach szczególnych użyto powiększenia 5000x.

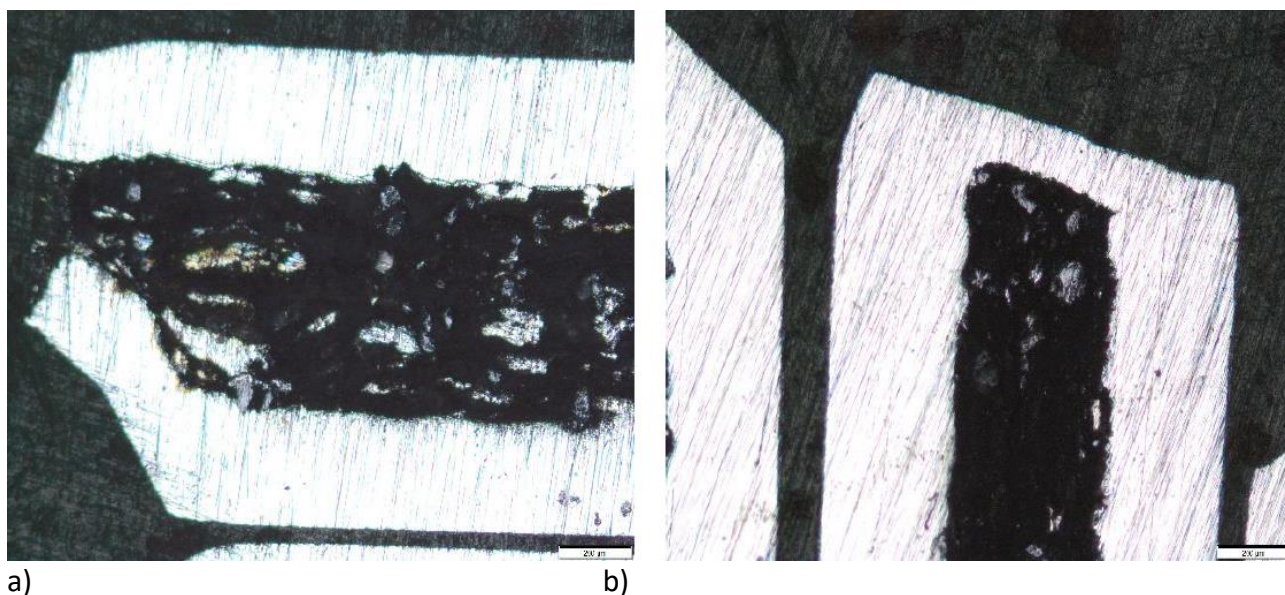


Rys. 2.1. Próbkę drutów w stanie dostawy zamocowane na podkładce do badania mikroskopowego SEM.

Pomiar ilości wodoru dyfundującego w stopiwie przeprowadzono metodą rtęciową zgodnie z normą PN-EN ISO 3690. Próbkę do badań spawano tymi samymi parametrami w osłonie mieszanki M21 (Ar+CO<sub>2</sub>) wg normy PN-EN ISO 14175. Prędkość podawania drutu wynosiła 7 m/min, napięcie łuku 25 V, prędkość spawania 30 cm/min. Ekstrakcję wodoru realizowano w podwyższonej temperaturze (45°C) przez 72 godziny.

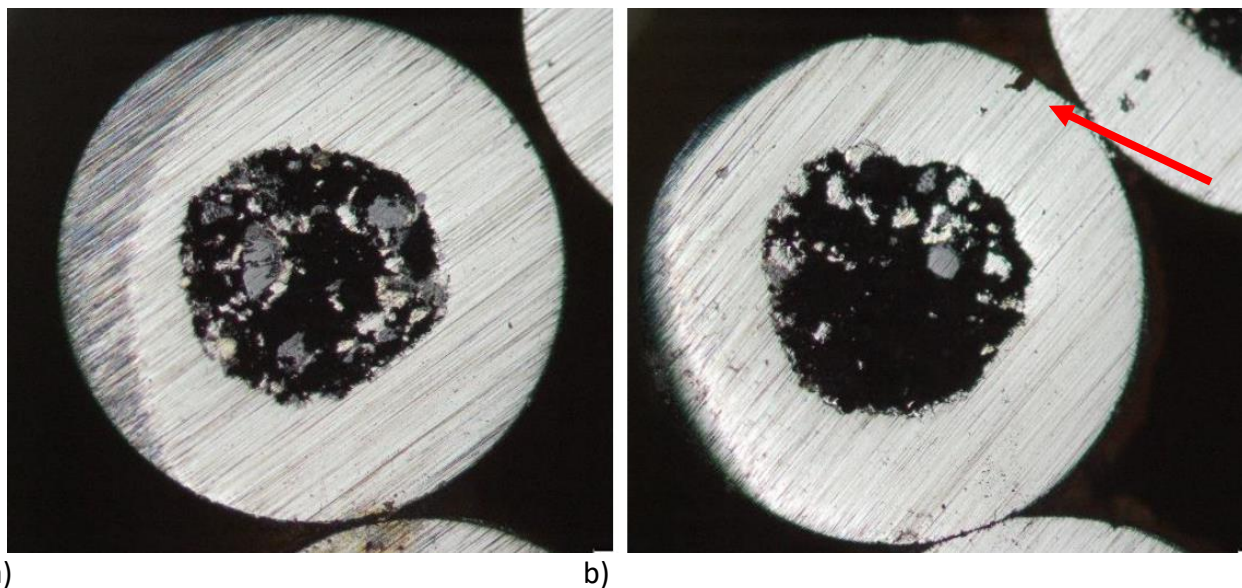
### 2.3 Wyniki badań

Wyniki badań metalograficznych mikroskopowych dla drutu C przedstawiono na rysunkach 2.2-2.5. Podczas obserwacji zgrądów przekrojów wzdłużnych przy powiększeniu 50x zauważono widoczne na rysunku 2.2 zjawisko „zamykania” się drutów podczas odcinania. Wystąpiło to w drutach B i C, które poddano przechowywaniu. W przypadku drutu D nie doszło do zamknięcia w miejscu cięcia, ale stwierdzono zauważalnie mniejszą szczelinę względem drutu w stanie dostawy.



Rys. 2.2. Przekrój wzdłużny drutu C: a) w stanie dostawy, b) w stanie po przechowywaniu. Powiększenie 50x.

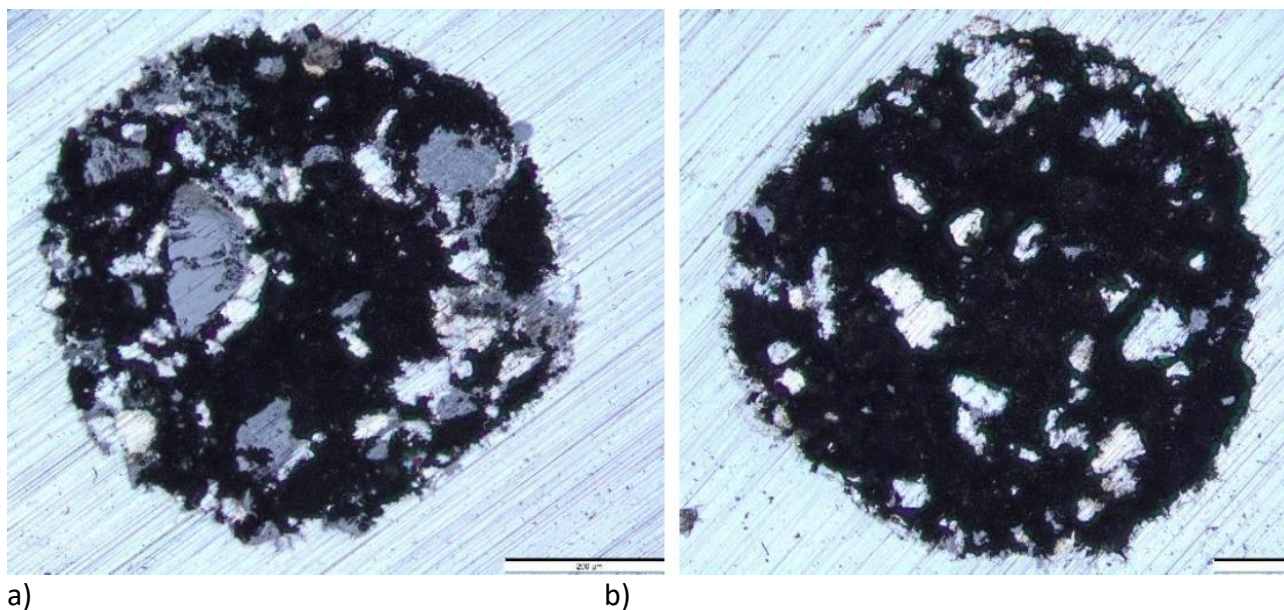
W przypadku obserwacji przekroju poprzecznego przy powiększeniu 50x zauważono miejsca, w których doszło do powstania wżerów korozyjnych na powierzchni zewnętrznej, co przedstawiono na rysunku 2.3. Sytuacja ta miała miejsce w drutach B i C w stanie po przechowywaniu.



Rys. 2.3. Przekrój poprzeczny drutu C: a) w stanie dostawy, b) w stanie po przechowywaniu. Strzałką oznaczono miejsce pojawienia się wżeru korozyjnego. Powiększenie 50x.

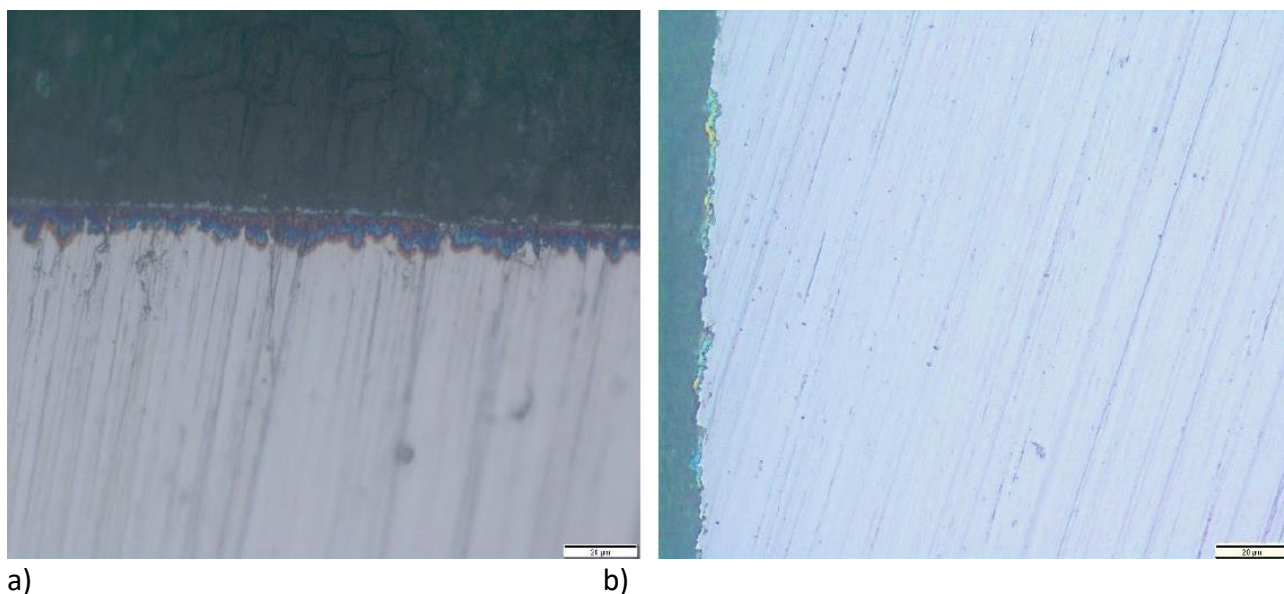
Rdzeń poddano obserwacji w powiększeniu 100x. Zauważono, że w przypadku przechowywanych drutów B i C krawędź między rdzeniem a koszulką jest bardziej nieregularna, rysunek 2.4. W drucie D geometria rdzenia w stanie dostawy i po przechowywaniu jest zbliżona i bez większych zmian, ale mniej symetryczna niż w przypadku drutów B i C. Dodatkowo zauważono zmianę struktury rdzenia po procesie przechowywania. W drutach nieprzechowywanych łatwo dostrzegalne są duże ziarna proszku, natomiast w drutach przechowywanych proces przygotowywania ich do obserwacji spowodował usunięcie największych cząstek proszku. Największe różnice zauważono w drutach B i C, a mniejsze w przypadku drutu D. Może to oznaczać, że warunki, w których przechowywane były druty wpłynęły na spistość wypełnienia proszkowego.





Rys. 2.4. Rdzeń proszkowy drutu C: a) w stanie dostawy, b) w stanie po przechowywaniu.  
Powiększenie 100x.

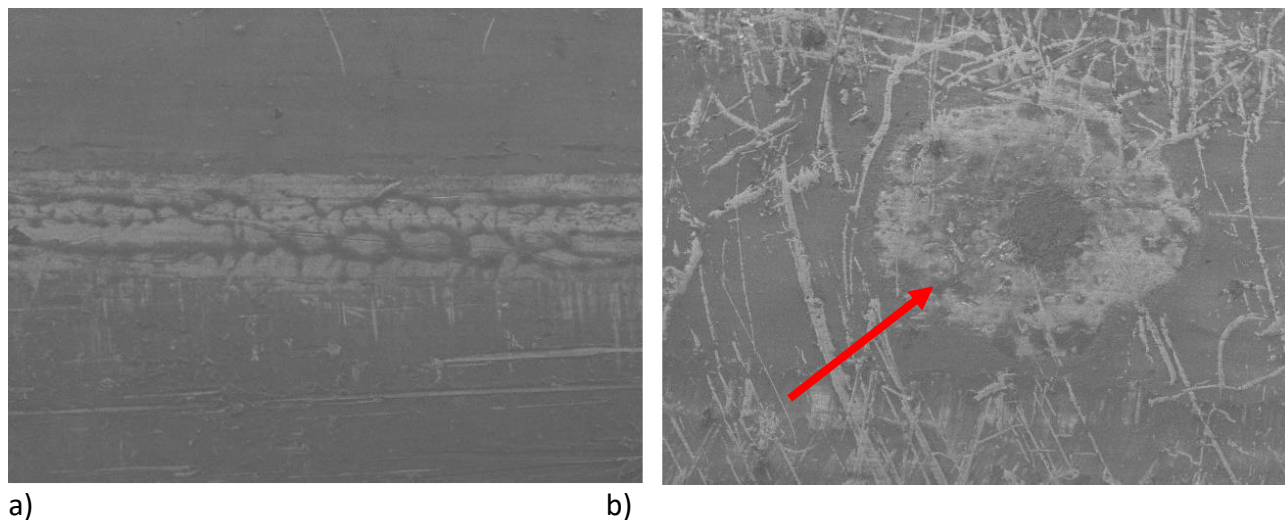
W czasie obserwacji warstwy miedzi naniesionej na powierzchnię zewnętrzną drutów zauważono w każdym z przypadków ubytek grubości warstwy spowodowany przechowywaniem. Najbardziej zauważalny był on w przypadku drutu C. Na rysunku 2.5 przedstawiono drut z największym ubytkiem warstwy miedzi, który doprowadził miejscami do odsłonięcia stalowej koszulki. Może być to jedną z przyczyn powstania wżerów korozyjnych na powierzchni przechowywanych drutów. Zaobserwowano je m.in. na drucie C, co przedstawiono na rysunku 2.3b.



Rys. 2.5. Metalowa koszulka drutu C: a) w stanie dostawy, b) w stanie po przechowywaniu.  
Powiększenie 500x

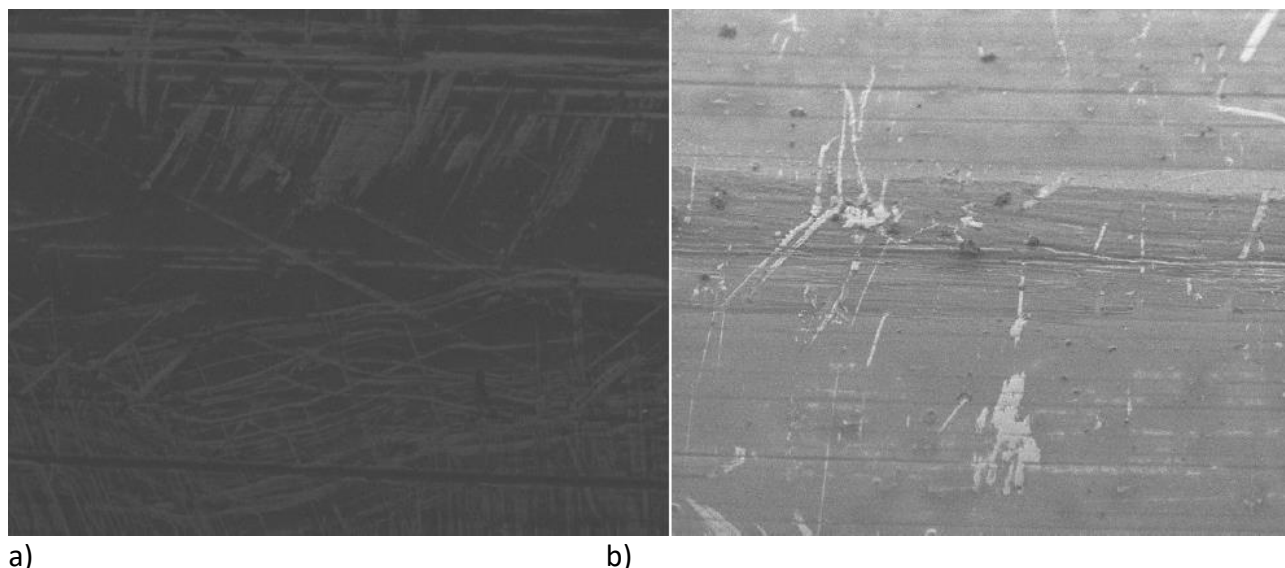
Z analizy powierzchni zewnętrznej drutów przeprowadzonej przy użyciu mikroskopii skaningowej SEM zauważono, że druty w stanie dostawy nie posiadały żadnych śladów korozji, warstwa miedzi w większości przypadków była jednolita. Wyjątkiem był drut D, który w miejscu

łączenia posiadał nieciągłość warstwy miedzi i nierównomierną powierzchnię, którą można zaobserwować na rysunku 2.6.



a) b)  
Rys. 2.6. Widok powierzchni zewnętrznej drutu D na SEM przy powiększeniu 500x, a) w stanie dostawy, b) po przechowywaniu. Strzałką zaznaczono miejsce występowania korozji.

Wpływ, jaki miały warunki przechowywania na stan drutów można zaobserwować porównując zdjęcia z mikroskopii części miedzianej drutów w stanie dostawy i przechowywanych. Można dostrzec na powierzchni liczne zmiany, które szczególnie są uwydatnione w przypadku drutów B i D. Na rysunkach 2.6 i 2.7 widać produkty korozji o różnej postaci. W przypadku drutu B produkty korozji nie przylegały ściśle do powierzchni i miały formę nieregularnych wydzielen. Natomiast w drucie D ściśle przylegały do powierzchni, posiadały regularny i okrągły kształt lub formę przewężonego owalu, odstającego od powierzchni. Zauważono również liczne miejsca nieciągłości pokrycia miedzią, co spowodowało odsłonięcie części stalowej drutów proszkowych. Widoczne to było zwłaszcza na powierzchni drutu C.



a) b)  
Rys. 2.7. Widok powierzchni zewnętrznej drutu B na SEM przy powiększeniu 500x, a) w stanie dostawy, b) po przechowywaniu.



W tabeli 2.3 zamieszczono średnie wyniki pomiaru ilości wodoru dyfundującego metodą rtęciową. W stanie dostawy jedynie drut C spełniał kryterium dla procesu niskowodorowego (H5). Druty B i C w stanie dostawy nieznacznie przekroczyły zawartość 5 ml wodoru na 100 g stopiwa. Można zauważyć, że dla każdego z gatunków drutów po przechowywaniu odnotowano wzrost zawartości wodoru dyfundującego względem stanu dostawy. Wzrost ten mieścił się średnio w przedziale 0,5-1 ml/100g stopiwa i nie powodował wzrostu zawartości wodoru do wartości określanych jak dla metod wysokowodorowych (10-15 ml/100g stopiwa).

Tab. 2.3. Średnia ilość wodoru dyfundującego w stopiwie drutów proszkowych

Gatunek drutu	Ilość wodoru dyfundującego w stopiwie [ml/100g]	
	W stanie dostawy	Po przechowywaniu
B	5,9	6,4
C	2,2	3,2
D	5,7	6,4

### 3. Podsumowanie

W artykule wykazano, że przechowywanie drutów proszkowych w warunkach przemysłowych może powodować ich degradację oraz absorpcję wilgoci, co może mieć negatywny wpływ na jakość wykonywanych złączy spawanych.

Warunki panujące podczas przechowywania drutów proszkowych przekraczały maksymalne wartości temperatury i wilgotności zalecane przez producentów. Podczas przechowywania odnotowano maksymalną temperaturę 35,2°C i maksymalną wilgotność 100%. Warunki te wpłynęły niekorzystnie na powierzchnię zewnętrzną drutów, co wykazano za pomocą obserwacji na mikroskopie świetlnym i skaningowym.

Badania metalograficzne mikroskopowe przekrojów drutów proszkowych również potwierdziły wpływ przechowywania. Zaobserwowano m.in.: ubytek grubości warstwy miedzi, formowanie się wżerów korozyjnych na powierzchni zewnętrznej koszulki drutów, zmiany geometrii rdzenia oraz spoistości wypełnienia proszkowego. Zaobserwowane zjawisko „zamykania” końcówki drutów proszkowych po ich mechanicznym odcinaniu może być bardzo korzystne – odcina jedną z możliwości wnikania wilgoci do wnętrza drutów. Jest to szczególnie istotne w przypadku drutów bezszwowych, które charakteryzują się brakiem otwartego szwu.

Pomiary zawartości wodoru dyfundującego w stopiwie wykazały, że niewłaściwe przechowywanie materiałów dodatkowych do spawania metodą FCAW powoduje absorpcję wilgoci przez rdzeń. Zjawisko to wystąpiło pomimo zamkniętego szwu ograniczającego wpływ środowiska na drut. Wzrost zawartości wodoru dyfundującego odnotowano dla każdego gatunku drutów. Żaden z nich w efekcie przechowywania nie został zakwalifikowany w innej kategorii niż w stanie dostawy, jednak w wielu zastosowaniach wzrost nawet o 1 ml/100g stopiwa może przyczynić się do powstania pęknięć zimnych w złączach spawanych lub do zwiększenia porowatości spoin.

### 4. Wnioski

- Przechowywanie drutów proszkowych w warunkach przemysłowych może powodować przekroczenie zalecanych przez producentów maksymalnych wartości temperatury i wilgotności.

- Przechowywanie różnych gatunków bezszwowych drutów proszkowych ma wpływ na ich powierzchnię – uszkodzenie warstwy miedzi i powstawanie ognisk korozji oraz na strukturę rdzenia – zmniejszenie spoistości wypełnienia proszkowego.
- Wysoka wilgotność względna w połączeniu w wysoką temperaturą podczas procesu przechowywania drutów proszkowych wpływają na wzrost zawartości wodoru dyfundującego w stopiwie, niezależnie od gatunku drutu.

### **Bibliografia**

- [1] Park M, Kim J, Pyo C, Son J, Kim J. Research for the Optimal Flux-Cored Arc Welding Process of 9% Nickel Steel Using Multi Object Optimization with Solidification Crack Susceptibility. Materials, 2021
- [2] Żegleń K, Kurasiak M, Procelewski K, Całek G. Wpływ współczynnika wypełnienia drutów proszkowych z rdzeniem metalicznym na wydajność i stabilność procesu spawania. Welding Technology Review, 2016
- [3] Gucwa M, Winczek J, Dośpiał M, Bęczkowski R. Structure and properties of coatings made with self shielded cored wire. Archives of Foundry Engineering. The Katowice Branch of the Polish Academy of Sciences, 2016
- [4] Świerczyńska A. Effect of Storage Conditions of Rutile Flux Cored Welding Wires on Properties of Welds. Advances in Materials Science -Vol. 19,iss. 4 (2019), s.46-56