

### Streszczenie

W artykule scharakteryzowano technologie wytwarzania złączy poprzecznych rurociągów energetycznych w aspekcie kontroli ilości wodoru dyfundującego. Oznaczono zawartość wodoru dyfundującego w stopiwie dla złączy wielościegowych wykonanych elektrodami o otulinie celulozowej i zasadowej. Ustalono, że po wykonaniu 5 ściegów ilość wodoru dyfundującego spada z około 40 ml/100 g do poziomu 5-10 ml/100 g w zależności od zastosowanej technologii i zaproponowano wyjaśnienie mechanizmów odpowiedzialnych za to zjawisko.

### Wprowadzenie

Zapewnienie ciągłych dostaw paliw jest bardzo ważnym zagadnieniem bezpieczeństwa energetycznego każdego kraju. Znaczna część energii wykorzystywanej przez przemysł i gospodarstwa domowe pochodzi ze spalania gazu ziemnego, który jest transportowany do odbiorców rurociągami. Rurociągi przesyłowe są budowane z elementów ze stali o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości o długości 12 albo 18 m, więc ilość złączy poprzecznych zazwyczaj wynosi 50-85 na kilometr [1].

Złącza poprzeczne rurociągów można wykonywać różnymi technologiami. Najczęściej korzysta się z procesów 111 (elektrodami celulozowymi lub zasadowymi), 114, 121, 135 (w tym również prądem pulsującym) i 136, przy czym powszechne jest zastosowanie do wykonania jednego złącza dwóch albo więcej procesów. Jedną z typowych technologii jest zastosowanie spawania elektrodami otulonymi w następujący sposób: pierwszy (graniowy) albo pierwsze dwa (graniowy i „gorący”) ściegi wykonywane są elektrodami o otulinie celulozowej (EC), a kolejne (wypełniające i licowe) elektrodami zasadowymi (EB). Często stosowana jest również procedura polegająca na wykonaniu dwóch ściegów elektrodami celulozowymi, a kolejnych drutami proszkowymi [2].

Obecność krytycznej ilości wodoru w złączach spawanych ze stali może zadecydować o jej spawalności. Za główne źródło wodoru w przypadku spawania elektrodami otulonymi uważa się wilgoć pochodzącą z otuliny oraz produkty rozpadu jej składników organicznych. Zależność taką dostrzeżono już dawno i od wielu lat jest badana [3].

Ilość wodoru dyfundującego w złączach spawanych zmienia się w stopniu zależnym od przyjętej technologii, a więc zastosowanych procesów, materiałów dodatkowych oraz parametrów spawania. W odniesieniu do spawania wielościegowego, na podstawie analizy teoretycznej zjawiska oraz informacji literaturowych, można oczekiwać, że wzrost ilości ściegów będzie skutkowało zmniejszeniem zawartości wodoru dyfundującego w stopiwie. Pomimo tego, że zagadnienie ma duże znaczenie praktyczne jest jedynie wzmiankowane w nielicznych publikacjach [4]. Stan wiedzy w rozpatrywanym obszarze wymaga w szczególności uzupełnienia o informacje o charakterze ilościowym.

### Badania własne

Celem pracy była ilościowa ocena stopnia nawodorowania stopiwa podczas spawania dwoma typowymi dla złączy poprzecznych rurociągów przesyłowych technologiami (MMA i FCAW).

Zakres prac badawczych obejmował pomiary ilości wodoru dyfundującego w stopiwie:

- trzech próbek z jednym ściegiem wykonanym elektrodą celulozową - EC (czas do rozpoczęcia ekstrakcji 3 minuty),
- trzech próbek z dwoma ściegami wykonanymi elektrodami celulozowymi - EC+EC,
- trzech próbek z dwoma ściegami wykonanymi elektrodami celulozowymi i jednym ściegiem wykonanym elektrodą zasadową - EC+EC+EB,
- trzech próbek z dwoma ściegami wykonanymi elektrodami celulozowymi i dwoma ściegami wykonanymi elektrodami zasadowymi - EC+EC+EB+EB,
- trzech próbek z dwoma ściegami wykonanymi elektrodami celulozowymi i trzema ściegami wykonanymi elektrodami zasadowymi - EC+EC+EB+EB+EB,
- trzech próbek z dwoma ściegami wykonanymi elektrodami celulozowymi i jednym ściegiem wykonanym drutem proszkowym - EC+EC+FCAW,
- trzech próbek z dwoma ściegami wykonanymi elektrodą celulozową i dwoma ściegami wykonanymi drutem proszkowym - EC+EC+FCAW+FCAW,
- trzech próbek z dwoma ściegami wykonanymi elektrodą celulozową i trzema ściegami wykonanymi drutem proszkowym - EC+EC+FCAW+FCAW+FCAW.



Dodatkowo przeprowadzono badania, których celem było zweryfikowanie wpływu na wyniki oznaczeń czasu opóźnienia rozpoczęcia ekstrakcji wodoru o 15 min spowodowanego spawaniem wielościegowym.

Ilość wodoru dyfundującego w stopiwie oznaczono metodą glicerynową [4]. Stanowisko badawcze pokazano na rysunku 1. Procedura pomiarowa obejmuje: pomiar masy próbki przed napawaniem, wykonanie napoiny próbnej, pomiar masy próbki z napoiną, umieszczenie jej w stanowisku pomiarowym, ekstrakcję wodoru w czasie 72 h, odczyt ilości wodoru zgromadzonego w części pomiarowej stanowiska oraz przeliczenie wyniku na warunki normalne i odniesienie uzyskanej wartości do 100 g stopiwa.

Do oznaczania ilości wodoru dyfundującego przy spawaniu wielościegowym zastosowano próbki o zmodyfikowanym kształcie [4]. Próbki zostały wykonane z prętów o przekroju kwadratowym ze stali węglowej S235, w których wyfrezowano rowki zgodnie z rysunkiem 2.

Napoiny próbne wykonano urządzeniem spawalniczym FastMig MXF 65 i elektrodami o otulinie celulozowej o średnicy 3,2 mm ShieldArcHyp+ (E 42 2 Mo C 25) i zasadowej o średnicy 4 mm OK 4808 (E 42 4 B 32 H5) oraz drutem proszkowym rutylnym o średnicy 1,2 mm Outershield 71M-H (T 46 2 P M 2 H5).

Rys. 1. Stanowisko do oznaczania ilości wodoru dyfundującego metodą glicerynową

# Oznaczanie ilości wodoru dyfundującego przy spawaniu wielościegowym

Autorzy:  
dr inż. Dariusz Fydrich,  
dr inż. Aleksandra Świerczyńska, dr inż. Grzegorz Rogalski

Elektrody zasadowe suszono przed spawaniem według zaleceń producenta. Natężenie przepływu gazu osłonowego M21 wynosiło 18 l/min. Napoiny wykonano prądem stałym o biegunowości dodatniej. Ilość wprowadzonego ciepła wyniosła od 0,55 do 0,9 kJ/mm dla pierwszych ściegów, od 0,82 do 1,0 kJ/mm dla drugich ściegów oraz od 1,0 do 1,5 kJ/mm i od 0,93 do 1,2 kJ/mm odpowiednio dla ściegów wykonanych elektrodami zasadowymi i drutem proszkowym. Na rysunku 3 pokazano fotografie przykładowych próbek.



Rys. 2. Próbkę do pomiarów ilości wodoru w złączach wielościegowych: a=b=12 mm, r=4 mm, L=120 mm

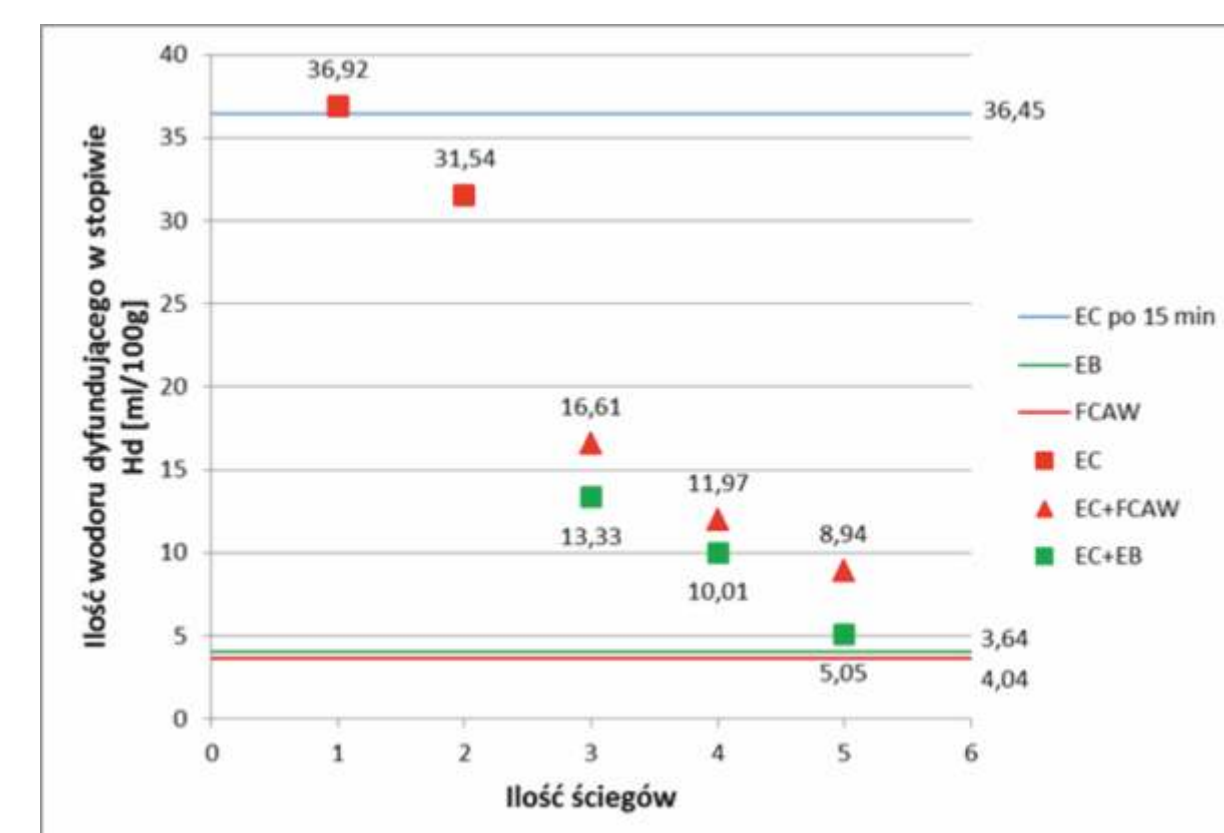


Rys. 3. Próbki z napoinami: a) próbka z jednym ściegiem (EC); b) próbka z czterema ściegami (EC+EC+EB+EB)

### Podsumowanie

Z analizy rezultatów badań przedstawionych na rysunku 4 zgodnie z przewidywaniami wynika, że spawanie wielościegowe zmniejsza ilość wodoru dyfundującego w stopiwie. O intensywności tego zjawiska decydują dwa mechanizmy. Pierwszy polega na wzmożonej dyfuzji wodoru z próbki do otoczenia spowodowanej oddziaływaniem ciepła pochodzącego z wykonywania kolejnych ściegów. Drugim mechanizmem jest wymieszanie stopiwa (z elektrody celulozowej i zasadowej) o znacznej różnicy (około 33 ml/100 g) zawartości wodoru. Tym drugim mechanizmem można tłumaczyć fakt, że różnica zawartości wodoru dyfundującego między próbkami o jednym ściegu wykonanym elektrodami celulozowymi (EC) i próbkami o pierwszym ściegu wykonanym elektrodami celulozowymi i drugim elektrodami zasadowymi (EC+EB) jest znacznie wyższa (około 16 ml/100 g) niż różnica (około 5 ml/100 g) zawartości wodoru dyfundującego między kolejnymi próbkami wykonanymi elektrodami celulozowymi i zasadowymi (EC+EB oraz EC+EB+EB). Analogiczne zjawisko występuje w przypadku drugiej technologii. W zakresie przeprowadzonych badań nie osiągnięto poziomu procesów niskowodorowych (H5).

Z drugiej części badań wynika, że wydłużenie czasu pomiędzy wykonaniem napoiny a umieszczeniem próbki w stanowisku pomiarowym nie wpłynęło na wskazania ilości wodoru dyfundującego w stopiwie.



Rys. 4. Wpływ ilości ściegów na zawartość wodoru dyfundującego w stopiwie

Z punktu widzenia mechanizmu formowania się pęknięć zimnych bardziej adekwatną miarą ilości wodoru dyfundującego w złączu jest odniesienie jego zawartości do masy przetopionego metalu (spoiny). Spawanie wielościegowe jednocześnie obniża ilość wodoru dyfundującego i zwiększa objętość spoiny, a więc wpływa dwutorowo na zmniejszenie jej nawodorowania. Zweryfikowanie tej hipotezy wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań.

### Wnioski

W przypadku dwóch badanych typowych technologii spawania rurociągów wzrost ilości ściegów spowodował zmniejszenie zawartości wodoru dyfundującego w stopiwie z 36,92 do 5,05 ml/100 g dla metody MMA oraz do 8,94 ml/100g dla ściegów wykonanych metodą MMA i FCAW.

W przyjętym zakresie badań nie osiągnięto poziomu procesów niskowodorowych, a spawanie łukowe elektrodą otuloną stwarza większe prawdopodobieństwo jego osiągnięcia.

Wydłużenie czasu opóźnienia umieszczenia próbek w stanowiskach pomiarowych do 15 minut nie wpłynęło na wyniki oznaczania wodoru dyfundującego w stopiwie, co świadczy o tym, że wyniki z pierwszej części badań nie są obciążone błędem proceduralnym.

### Literatura

- [1] Bielawski J., Scaurszki T.: Współczesna krajowa i zagraniczna praktyka w spawaniu rurociągów wysokociśnieniowych. Materiały VI Krajowej Naukowo-Technicznej Konferencji Spawalniczej „Jakość w spawalnictwie”, Międzyzdroje 8-10.05.2001.
- [2] Felber S.: Mechanical-technological and fracture mechanical properties of the high grade pipeline-steel X80 with results of different pipeline-projects. Welding in the World 5-6/2008.
- [3] Tasak E.: Metalurgia spawania. Wydawnictwo JAK, Kraków 2008.
- [4] Fydrich D., Świerczyńska A., Rogalski G.: Diffusible hydrogen content in the deposited metal of multilayer welded joints. Metallurgy and Foundry Engineering 4/2013.

**Kontakt:**  
POLITECHNIKA GDAŃSKA  
Wydział Mechaniczny  
Katedra Inżynierii Materiałowej i Spajania

ul. G. Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk  
http://mech.pg.edu.pl

# 58. KONFERENCJA SPAWALNICZA

TECHNOLOGIE XXI WIEKU

ExpoWELDING

18-20.10.2016; Sosnowiec