

# Pomiary ilości wodoru dyfundującego w stopiwie elektrod celulozowych i zasadowych

## Determination of diffusible hydrogen content in deposited metal of cellulosic and basic electrodes

### Streszczenie

W artykule scharakteryzowano technologię wytwarzania złączy poprzecznych rurociągów energetycznych w aspekcie kontroli ilości wodoru dyfundującego. Oznaczono zawartość wodoru dyfundującego w stopiwie dla złączy wielościgowych wykonanych elektrodami w otulinie celulozowej i zasadowej. Ustalono, że po wykonaniu 4 ścigów ilość wodoru dyfundującego spada z ok. 40 ml/100 g do 12 ml/100 g i podjęto próbę wyjaśnienia mechanizmów odpowiedzialnych za to zjawisko.

**Słowa kluczowe:** rurociągi przesyłowe, wodór dyfundujący, spawanie elektrodami otulonymi, elektrody celulozowe, elektrody zasadowe

### Abstract

The article describes manufacturing technology of circumferential joints of transportation pipelines in terms of control the diffusible hydrogen content. Diffusible hydrogen content in deposited metal for multilayer joints made of coated cellulosic and basic electrodes was determined. It was found that after four beads the diffusible hydrogen content decreases from about 40 ml/100 g to 12 ml/100 g. The explanation of the mechanisms responsible for this phenomenon was proposed.

**Keywords:** transportation pipelines, diffusible hydrogen, manual metal arc welding, cellulosic electrodes, basic electrodes

## Wstęp

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, długości 12 lub 18 m, więc liczba złączy poprzecznych zazwyczaj wynosi 50÷85 na km [1÷6]. Rurociągi mają długość setek i tysiący kilometrów,

dlatego wykonywanie tak dużej liczby złączy, realizowane często w trudnych warunkach terenowych i atmosferycznych, wymaga właściwej organizacji pracy oraz zastosowania procesów spawania o dużej wydajności [3÷9].

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 [1÷11]. Jedną z typowych technologii jest spawanie

Dr inż. Dariusz Fydrych, mgr inż. Piotr Malinowski, mgr inż. Aleksandra Świerczyńska, dr inż. Grzegorz Rogalski  
– Politechnika Gdańska.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: darfydry@pg.gda.pl

elektrodami otulonymi w następujący sposób: pierwszy (graniowy) albo pierwsze dwa (graniowy i „gorący”) ściegi wykonywane są elektrodami w otulinie celulozowej (EC), a kolejne (wypełniające i licowe) elektrodami zasadowymi (EB).

Zastosowanie elektrod o otulinie celulozowej do wykonywania ściegów graniowych w pozycji PG podyktowane jest wysoką wydajnością spawania oraz mniejszymi wymaganiami odnośnie dokładności przygotowania brzegów elementów do spawania [3, 12÷16]. Duża ilość gazów osłonowych powstałych z organicznych składników otuliny umożliwia skuteczną ochronę obszaru spawania. Jednak zastosowanie elektrod celulozowych powoduje silne nawodorowanie jeziora spawalniczego. Ilość wodoru dyfundującego w stopiwie w tym przypadku wynosi ok. 30÷60 ml/100 g [3, 13, 17, 18].

Elektrody zasadowe są wykorzystywane do spawania konstrukcji odpowiedzialnych ze względu na wysokie właściwości złączy. Spawanie elektrodami zasadowymi jest procesem niskowodorowym: elektrody w stanie dostawy i suszone według zaleceń producenta zawierają poniżej 5 ml/100 g wodoru dyfundującego w stopiwie [18÷20].

Obecność krytycznej ilości wodoru w złączach spawanych ze stali może zdecydować o jej spawalności. Zależność taką dostrzeżono już dawno i od wielu lat jest ona badana [18÷27]. Za główne źródło wodoru w przypadku spawania elektrodami otulonymi uważa się wilgoć pochodzącą z otuliny oraz produkty rozpadu jej składników organicznych.

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 liczby ściegów będzie powodował zmniejszenie zawartości wodoru dyfundującego w stopiwie.

Pomimo tego, że zagadnienie ma duże znaczenie praktyczne, jest jedynie wzmiankowane w nielicznych publikacjach [3, 13]. 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 wykonywania złączy wykonanych jedną z typowych dla złączy poprzecznych rurociągów przesyłowych technologii spawania.

Zakres prac badawczych obejmował pomiary ilości wodoru dyfundującego w stopiwie:

- próbek z jednym ściegiem wykonanym elektrodą celulozową – EC (czas do rozpoczęcia ekstrakcji 3 minuty),

- próbek z jednym ściegiem wykonanym elektrodą celulozową i jednym ściegiem wykonanym elektrodą zasadową – EC+EB,
- próbek z jednym ściegiem wykonanym elektrodą celulozową i dwoma ściegami wykonanymi elektrodami zasadowymi – EC+EB+EB,
- próbek z jednym ściegiem wykonanym elektrodą celulozową i trzema ściegami wykonanymi elektrodami zasadowymi – EC+EB+EB+EB.

Dodatkowo wykonano badania, których celem było zweryfikowanie wpływu na wyniki oznaczeń czasu opóźnienia rozpoczęcia ekstrakcji wodoru spowodowanego spawaniem wielościegowym:

- próbek z jednym ściegiem wykonanym elektrodą celulozową – EC (czas do rozpoczęcia ekstrakcji 6 min),
- próbek z jednym ściegiem wykonanym elektrodą celulozową – EC (czas do rozpoczęcia ekstrakcji 9 min),
- próbek z jednym ściegiem wykonanym elektrodą celulozową – EC (czas do rozpoczęcia ekstrakcji 12 min).

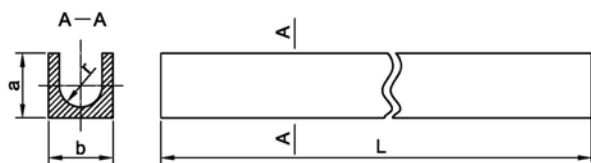
Ilość wodoru dyfundującego w stopiwie oznaczono metodą glicerynową [20, 25, 27]. Stanowisko badawcze pokazano na rysunku 1. Procedura pomiarowa ilości wodoru dyfundującego obejmuje: zważenie próbki przed napawaniem, wykonanie napoiny próbnej, zważenie próbki z napoینą, umieszczenie jej w stanowisku pomiarowym, 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.



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

**Fig. 1.** Test stand for determination of diffusible hydrogen content by glycerin method

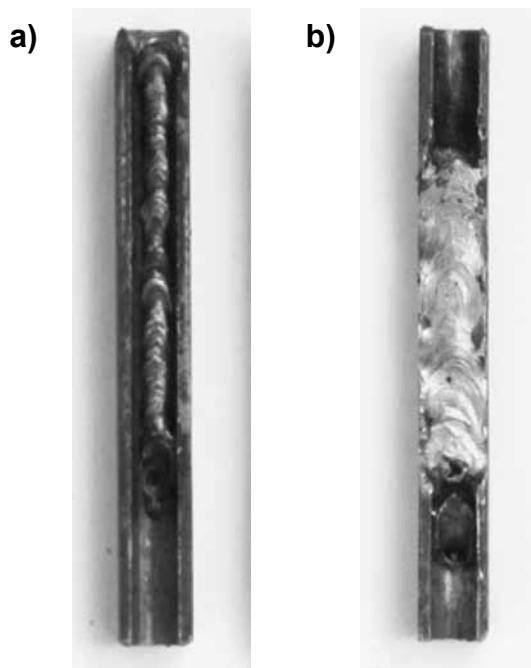
Do oznaczania ilości wodoru dyfundującego przy spawaniu wielościegowym stosuje się próbki o zmodyfikowanym kształcie [20]. Próbki zostały wykonane z prętów o przekroju kwadratowym ze stali węglowej S235, w których wyfrezowano rowki zgodnie z rysunkiem 2.



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

**Fig. 2.** Specimen for determination of diffusible hydrogen content in multilayer joints

Napoiny próbne wykonano urządzeniem spawalniczym ARISTO 4000i i elektrodami o średnicy 4 mm: elektroda o otulinie celulozowej ShieldArcHyp+ (E 42 2 Mo C 25) firmy Lincoln Electric oraz zasadowej OK 48.08 (E 42 4 B 32 H5) firmy Esab. Elektrody zasadowe suszono przed spawaniem według zaleceń producenta. Każda z napoin wykonywana była osobną elektrodą prądem stałym o biegunowości dodatniej. Napoiny wykonano z natężeniem prądu spawania z zakresu  $118 \div 123$  A, napięcie łuku wynosiło  $23 \div 29$  V, a ilość wprowadzonego ciepła  $0,9 \div 1,3$  kJ/mm. Po wykonaniu każdego ściegu próbki były natychmiast chłodzone w wodzie z lodem w celu zatrzymania dyfuzji wodoru. Na rysunku 3 pokazano fotografie przykładowych próbek, a w tabelicy I zamieszczono wyniki pomiaru ilości wodoru dyfundującego w stopiwie.



**Rys. 3.** Próbki z napoinami: a) próbka z jednym ściegiem; b) próbka z czterema ściegami

**Fig. 3.** Specimens with weld deposits: a) specimen with one weld bead; b) specimen with four weld beads

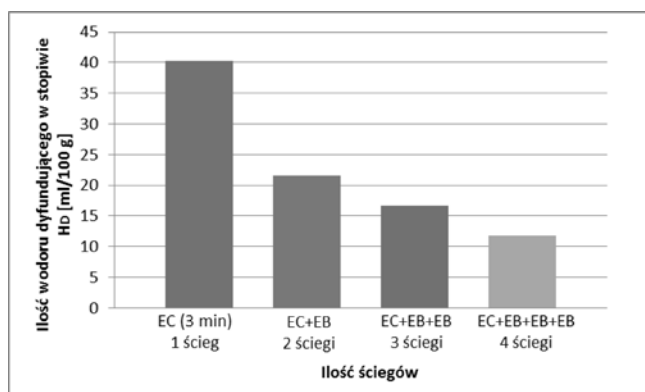
**Tablica I.** Wyniki oznaczania ilości wodoru dyfundującego w stopiwie  
**Table I.** Results of determination of diffusible hydrogen content in deposited metal

| L. p. | Rodzaj próbki | Ilość wodoru dyfundującego w stopiwie $H_D$ ml/100 g | Średnia ilość wodoru dyfundującego w stopiwie $H_D$ ml/100 g |
|-------|---------------|--|--|
| 1     | EC (3 min)    | 39,71  | 40,26  |
|       |               | 40,85  |  |
|       |               | 40,23  |  |
| 2     | EC+EB         | 23,21  | 21,61  |
|       |               | 19,06  |  |
|       |               | 22,57  |  |
| 3     | EC+EB+EB      | 17,84  | 16,70  |
|       |               | 16,56  |  |
|       |               | 15,72  |  |
| 4     | EC+EB+EB+EB   | 13,77  | 11,75  |
|       |               | 10,07  |  |
|       |               | 11,42  |  |
| 5     | EC (6 min)    | 38,33  | 38,23  |
|       |               | 37,98  |  |
|       |               | 38,38  |  |
| 6     | EC (9 min)    | 38,11  | 39,81  |
|       |               | 42,19  |  |
|       |               | 39,14  |  |
| 7     | EC (12min)    | 40,15  | 37,46  |
|       |               | 36,30  |  |
|       |               | 35,93  |  |

## Podsumowanie

Potencjalne awarie rurociągów przesyłowych niosą za sobą koszty związane z przerwami w dostawach paliw oraz zagrożenie dla bezpieczeństwa energetycznego. Stąd bardzo ważne jest zapewnienie jakości podczas wytwarzania elementów rurociągów oraz podczas ich łączenia. Opracowanie technologii spawania rurociągów wykonywanych ze stali o podwyższonej i wysokiej wytrzymałości wymaga ograniczenia skłonności do tworzenia pęknięć zimnych, a to można uzyskać dzięki stosowaniu niskowodorowych procesów spawania. 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 (ok. 36 ml/100 g) zawartości wodoru. Tym drugim mechanizmem można tłumaczyć fakt, że różnica zawartości wodoru dyfundującego między próbkami z jednym ściegiem wykonanym elektrodami celulozowymi (EC) i próbkami z pierwszym ściegiem wykonanym elektrodami celulozowymi i drugim elektrodami zasadowymi (EC+EB) jest znacznie wyższa (ok. 19 ml/100 g) niż różnica (ok. 5 ml/100 g) zawartości wodoru dyfundującego między kolejnymi próbkami wykonanymi elektrodami celulozowymi i zasadowymi (EC+EB oraz EC+EB+EB). Zaobserwować można prawie identyczny spadek zawartości wodoru dyfundującego na poziomie ok. 5 ml/100 g przy wykonaniu kolejnego ściegu elektrodą zasadową (EC+EB+EB+EB).



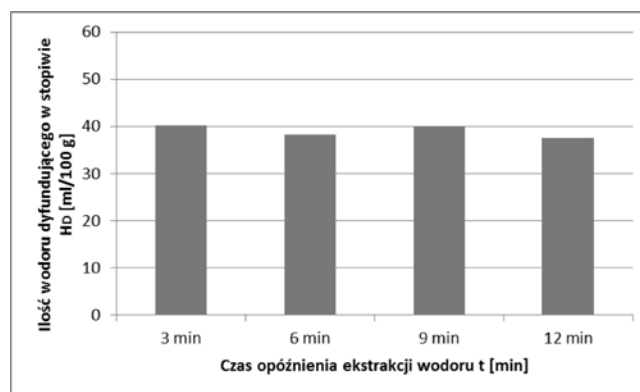
**Rys. 4.** Wpływ liczby ściegów na zawartość wodoru dyfundującego w stopiwie

**Fig. 4.** Effect of number of weld beads on diffusible hydrogen content in deposited metal

W zakresie przeprowadzonych badań nie osiągnięto poziomu procesów niskowodorowych (H5). Implikuje to kierunek kontynuacji badań, które należy wykonywać metodą rtęciową zalecaną do badania procesów niskowodorowych przez normę [28].

Z drugiej części badań (rys. 5) wynika, że wydłużenie czasu pomiędzy wykonaniem napoiny a umieszczeniem próbki w stanowisku pomiarowym nie wpłynęło na wskazania ilości wodoru dyfundującego w stopiwie. Świadczy to o tym, że wyniki z pierwszej części badań nie są obciążone błędem proceduralnym.

Z punktu widzenia mechanizmu formowania się pęknięć zimnych bardziej adekwatną miarą ilości wodoru dyfundującego w złączu jest odnoszenie jego zawartości do masy przetopionego metalu (spoiny) [20]. Spawanie wielościegowe jednocześnie obniża ilość wodoru dyfundującego i zwiększa objętość spoiny, a więc wpływa dwutorowo na zmniejszenie jej nawodorowania. Zweryfikowanie tej hipotezy wymaga dodatkowych badań.



**Rys. 5.** Zależność między czasem opóźnienia ekstrakcji wodoru a wskazaniami metody glicerynowej

**Fig. 5.** The relationship between the time delay of hydrogen extraction and results of measurement by glycerin method

## Wnioski

- W przypadku analizowanej typowej technologii spawania rurociągów wzrost liczby ściegów spowodował zmniejszenie zawartości wodoru dyfundującego w stopiwie z 40,26 do 11,75 ml/100 g, a więc w przyjętym zakresie badań nie osiągnięto poziomu procesów niskowodorowych.
- Wydłużenie czasu opóźnienia umieszczenia próbek w stanowiskach pomiarowych do 12 minut

nie wpłynęło na wyniki oznaczania wodoru dyfundującego w stopiwie.

- Badania można kontynuować w kierunku zweryfikowania możliwości osiągnięcia poziomu procesów niskowodorowych, jednak wymagałoby to zastosowania metody rtęciowej i próbek o innym kształcie umożliwiającym wykonanie większej liczby ściegów.

## Literatura

- [1] Bielawski J., Scaurski 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] Adamiec P., Josz K., Kucia J.: Prace spawalnicze przy budowie rurociągu przepływowego gazu w Austrii. Przegląd Spawalnictwa 11/1994.
- [3] Widgery D.: Spawanie rurociągów gazowych w nowym stuleciu. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 3/2000.
- [4] 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.
- [5] Felber S.: Welding of the high grade pipeline-steel X80 and description of different pipeline-projects. Welding in the World 5-6/2008.
- [6] Adamiec P., Dziubiński J., Tasak E.: Materiały i technologie wytwarzania rur. Odyseum, Warszawa 1998.
- [7] Keszthelyi F.: Spawanie rurociągów. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1977.
- [8] Widgery D.: Double jointing of high strength pipelines. Welding in the World 11-12/2010.
- [9] Gianetto J. A., Bowker J. T., Dorling D. V.: Assessment of properties and microstructure of X100 pipeline girth welds. Welding in the World 11-12/2005.
- [10] Yapp D., Blackman S. A.: Recent developments in high productivity pipeline welding. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 1/2004.
- [11] Anon. New low-hydrogen stick electrode helps pipeline contractor. Pipeline&Gas Journal 10/2009.
- [12] Liu H., Li H., Li Z., Shi Y.: Experimental study on metal transfer and welding spatter characteristics of cellulose electrode. Chinese Journal of Mechanical Engineering 7/2010.
- [13] Ramirez J. E., Johnson M.: Effect of welding parameters and electrode condition on alloying enrichment of weld metal deposited with coated cellulosic electrodes. Welding Journal 11/2010.
- [14] Pakos R.: Właściwości złączy spawanych wykonanych elektrodami zasadowymi i celulozowymi. Przegląd Spawalnictwa 4/2011.
- [15] Pakos R.: Ocena technologii spawania stali o podwyższonej wytrzymałości elektrodą celulozową. Przegląd Spawalnictwa 5/2011.
- [16] Posch G., Fiedler M., Berger W., Königshofer H., Fischer J.: Investigation of HAC-susceptibility of multi-layer welds with the “Bead Bend Test”. Procedure and Examples. Welding in the World 9/2006.
- [17] Brózda J., Zeman M.: Zwijana na gorąco w kręgi stal z podwyższoną zawartością niobu na rurociągi przesyłowe i jej spawalność. XVII Seminarium Naukowo – Techniczne: Badania materiałowe na potrzeby elektrowni i przemysłu energetycznego. Zakopane, 23-25 czerwca 2010.
- [18] Tasak E.: Metalurgia spawania. Wydawnictwo JAK, Kraków 2008.
- [19] Kozak T.: Resistance to cold cracking of welded joints made of P460NL1 steel. Advances in Materials Science 3/2011.
- [20] Pokhodnya I. K., Yavdishchin I. R., Paltsevich A. P., Shvachko V. I., Kotelchuk A. S.: Metallurgy of arc welding. Interaction metal with gases. Naukova Dumka, Kiev 2004.
- [21] Pańcikiewicz K., Zielińska-Lipiec A., Tasak E.: Cracking of high-strength steel welded joints. Advances in Materials Science 3/2013.
- [22] Granjon H.: The “implants” method for studying the weldability of high strength steels. Metal Construction and British Welding Journal 11/1969.
- [23] Signes E. G., Howe P.: Hydrogen-assisted cracking in high-strength pipeline steels. Welding Journal 8/1988.
- [24] Vuik J.: An update of the state-of-the-art of weld metal hydrogen cracking. Welding in the World 5/1993.
- [25] Kotecki D. J.: Hydrogen reconsidered. Welding Journal 8/1992.
- [26] Lensing C. A., Park Y. D., Maroef I. S., Olson D. L.: Yttrium hydrogen trapping to manage hydrogen in HSLA steel welds. Welding Journal 9/2004.
- [27] Fydrych D., Tomków J., Świerczyńska A.: Determination of diffusible hydrogen content in deposited metal of rutile electrodes by glycerin method. Metallurgy and Foundry Engineering 1/2013.
- [28] PN-EN ISO 3690:2012 Spawanie i procesy pokrewne. Oznaczanie zawartości wodoru w metalu spoiny.

## PLANY SPAWANIA - TEORIA I PRAKTYKA – JACEK SŁANIA

### Cena

1 egzemplarz książki Jacka Słania:  
**Plany spawania – teoria i praktyka** wynosi:  
80 zł (w tym 5% VAT)

**W celu zamówienia książki  
w Redakcji należy wypełnić formularz  
zamieszczony obok i przesłać go  
w formie faksu, skanu lub listu na adres:**

### REDAKCJA – Przegląd Spawalnictwa AW SIMP

ul. Świętokrzyska 14a, 00-050 Warszawa  
tel.: 22 827 25 42, faks: 22 336 14 79  
e-mail: redakcja@pspaw.pl

### Wpłaty należy dokonać na rachunek bankowy:

Bank BPH S.A. Oddział w Warszawie  
**45 1060 0076 0000 3200 0043 1836**

Zamawiam książkę *Plany spawania – teoria i praktyka*  
w Redakcji Przegląd Spawalnictwa w liczbie .... egz.

Imię i nazwisko

Firma

Adres

NIP

Kontakt do osoby zamawiającej:

Oświadczam, że jestem podatnikiem VAT i upoważniam firmę do wystawienia faktury bez podpisu

Podpis