

# Ocena skłonności do pęknięć zimnych złączy spawanych stali w próbie implantacyjnej

## Evaluation of susceptibility to cold cracking of welded joints in the implant test

### Streszczenie

W artykule przedstawiono próbę implantacyjną oceny skłonności do pęknięć zimnych złączy spawanych. Przedstawiono również wyniki próby dla stali 7CrMoVTiB10-10 oraz badania w zakresie oceny charakteru przełomu.

**Słowa kluczowe:** próba implantacyjna; mikrostruktura; przełomy

### Abstract

The paper presents the implant test method as useful for susceptibility to cold cracking evaluation of welded joints. Moreover, there are presented results of implant test for 7CrMoTiVB10-10 steel and fractures analyses with the use of light microscopy and scanning electron microscopy.

**Keywords:** implant test; microstructure; fracture

### Wstęp

Pęknięcia zimne są typem pęknięć, które powstają podczas chłodzenia po spawaniu w temperaturach przemiany austenitu w struktury hartownicze, stąd występują przede wszystkim w stalach charakteryzujących się zwiększoną hartownością [1]. W celu oceny skłonności materiałów do tego typu pęknięć, stosuje się różnego rodzaju metody – od analitycznych po eksperymentalne, w tym próby znormalizowane w ISO 17642. Wśród metod eksperymentalnych można wydzielić dwie grupy: próby, w których geometria złącza próbnego powoduje jego utwierdzenie wprowadzając odpowiedni poziom naprężeń (CTS, Tekken, Lehigh), oraz próby, w których naprężenie zmienia się w sposób regulowany (Implant test).

### Próba implantacyjna

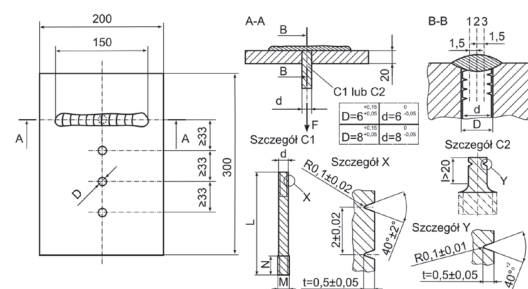
Próba implantacyjna (implant test) została opisana w PN-EN ISO 17642-3 [2]. Polega ona na obciążeniu siłą rozciągającą kołka z badanego materiału, po wcześniejszym umieszczeniu go w otworze wywierconym w blasze, na której układu się napoinę przechodzącą przez ten otwór. Rysunek 1 przedstawia wymagania dotyczące przygotowania i zasadę wykonywania próby implantacyjnej. Kołek o średnicy 6 lub 8 mm powinien być wykonany na drodze toczenia i posiadać karb śrubowy (rys. 1, szczegół C1 i szczegół X) lub karb pierścieniowy (rys. 1, szczegół C2 i szczegół Y).

Naprężenie rozciągające w płaszczyźnie karbu  $\sigma_j$ , w wielu przypadkach równe umownej granicy plastyczności materiału  $R_{p0,2}$ , jest obliczane za pomocą zależności 1:

$$\sigma_j = \frac{4F}{\pi(d-2t)^2} \frac{N}{\text{mm}^2} \quad 1)$$

gdzie: F – siła obciążająca (N), d – średnica kołka (mm).

Podczas próby rejestruje się czas jaki jest potrzebny do zerwania kołka, przy czym maksymalny czas wynosi 16 h. Jeżeli po tym czasie nie dojdzie do zerwania, dokonuje się obserwacji mikroskopowych na 3 zglądach metalograficznych przy powiększeniach w zakresie 400-600x, wykonanych w miejscach 1, 2 i 3 wskazanych na rysunku 1 (przekrój B-B). Zamiennie, można zastosować próbę polegającą na wyżarzeniu w temperaturze 250-300 °C/1 h z następnym obciążaniem o charakterze zmęczeniowym. W przypadku wykonywania pomiarów twardości w SWC kołka należy użyć metody Vickersa przy obciążeniu 98,1 N, zgodnie z EN 1043-1.



**Rys. 1.** Wymagania dotyczące przygotowania próbek i zasada wykonywania próby implantacyjnej  
**Fig. 1.** Requirements for sample preparation and execution rule for implant test

Mgr inż. Krzysztof Pańcikiewicz; dr hab. inż. Anna Zielińska-Lipiec, prof. AGH; dr inż. Lechosław Tuz; mgr inż. Łukasz Rakoczy – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: krzysztof.pancikiewicz@agh.edu.pl

## Metodyka i przebieg badań

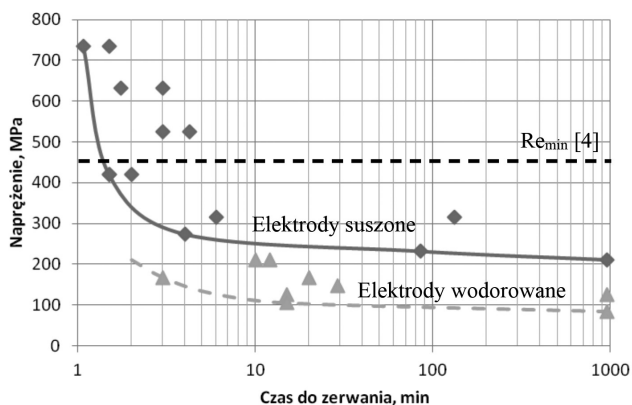
W celu oceny skłonności do pęknięć zimnych stali 7CrMo-VTiB10-10 oraz określenia wpływu wodoru dyfundującego na intensyfikację tego zjawiska wykonano próbę implantacyjną (kołkową). Do badań wykorzystano próbki z karbem śrubowym, pobrane z płaskownika ze stali 7CrMoVTiB10-10 o grubości 8 mm. Spawanie wykonywano ręcznie, metodą 111 prądem stałym z biegunowością dodatnią przy natężeniu prądu 110 A. Materiałem dodatkowym do spawania były zasadowe elektrody otulone Thermanit P24 w dwóch stanach – po suszeniu w piecu (350 °C/2 h) oraz po sztucznym wodorowaniu. Ilość wodoru dyfundującego oznaczono za pomocą metody glicerynowej, opisanej m.in. przez Fydrycha i in. [3]. Temperaturę próbki mierzono za pomocą pirometru laserowego PIROMETR ST-8869 firmy Standard Instruments Co. Gdy temperatura nad próbką po procesie obniżła się do 150 °C, dokonywano stopniowego obciążania kołka siłą rozciągającą. Podczas próby rejestrowano wartość przyłożonego naprężenia i czas do zerwania. Uzyskane w próbie implantacyjnej przełomy analizowano za pomocą mikroskopu stereoskopowego oraz skaningowego mikroskopu elektronowego.

W przypadku próbek, które nie uległy pęknięciu w czasie poniżej 16 h wykonywano zgląd metalograficzny, który był analizowany za pomocą mikroskopu świetlnego oraz pomiarów twardości. Mikrostrukturę obserwowano za pomocą mikroskopu świetlnego na obrabianych mechanicznie i nietrawionych oraz trawionych zglądach metalograficznych. Pomiar twardości na przekroju kołka wykonano metodą Vickersa przy obciążeniu 10 kG (98,1 N).

## Wyniki badań i ich dyskusja

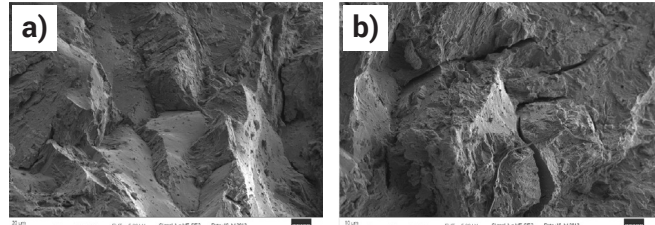
Zależność czasu do zerwania próbek od przyłożonego naprężenia przedstawiono na rysunku 2. Wartość naprężenia krytycznego w próbie spawania elektrodami wysuszonymi wynosi 211 MPa i jest istotnie niższa od minimalnej granicy plastyczności badanej stali, wynoszącej zgodnie z normą 450 MPa. Zawartość wodoru dyfundującego w stopiwie elektrod suszonych, wyznaczona za pomocą metody glicerynowej, wyniosła 5 ml/100 g stopiwa. W przypadku zastosowania elektrody sztucznie wodorowanej, w której zawartość wodoru dyfundującego zmierzono na poziomie 23 ml/100 g stopiwa, krytyczne naprężenie do zerwania wyniosło 84 MPa.

Analiza fraktograficzna wykazała, że pęknięcia lokalizowane są w obszarze gruboziarnistej strefy wpływu ciepła.



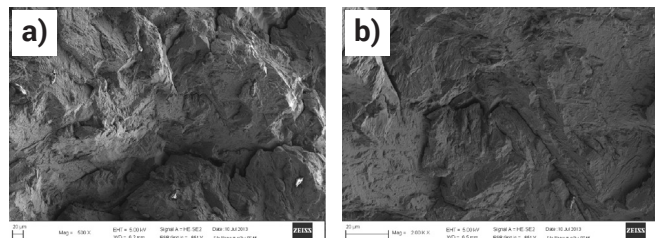
**Rys. 2.** Zależność czasu do zerwania próbek od przyłożonego naprężenia w próbie implantacyjnej, wykonanej dla stali 7CrMoVTiB10-10  
**Fig. 2.** The relationship of time to break and the applied stress in the implant test for the samples made of 7CrMoVTiB10-10 steel

Zainicjowane pęknięcie najczęściej propagowało w stronę spoiny. Przełomy charakteryzowały się międzykrystalicznym kruchym lub quasi-kruchym charakterem (rys. 3, 4). Miejscowo zaobserwowano również fragmenty przełomu z charakterystycznymi „naderwaniami” na płaskiej powierzchni (rys. 3). Zjawisko to jest charakterystyczne dla pęknięcia zimnego zwłocznego, zachodzącego w obecności wodoru. Dodatkowo, we wszystkich przypadkach obserwowano liczne pęknięcia wtórne, w przybliżeniu usytuowane w kierunku prostopadłym do powierzchni przełomu.



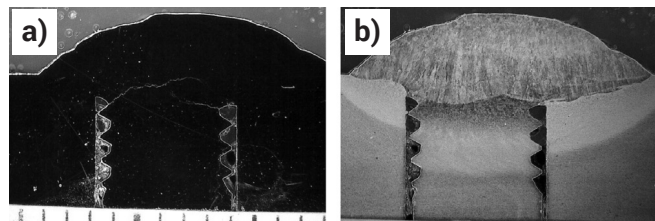
**Rys. 3.** Przełom próbki po próbie implantacyjnej: a) międzykrystaliczny charakter przełomu z widocznymi „naderwaniami” na płaskiej powierzchni b) pęknięcia wtórne po granicach ziarn

**Fig. 3.** Fracture of implant test sample: a) intergranular character of fracture with “tearing apart” on a flat surface, b) secondary cracks on the grain boundaries



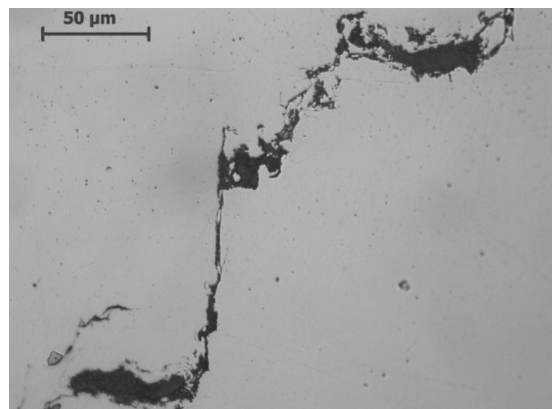
**Rys. 4.** Przełom próbki po próbie implantacyjnej: międzykrystaliczny charakter przełomu (a) z pęknięciami wtórnymi (b)

**Fig. 4.** Fracture of implant test sample: intergranular character of fracture with secondary cracks

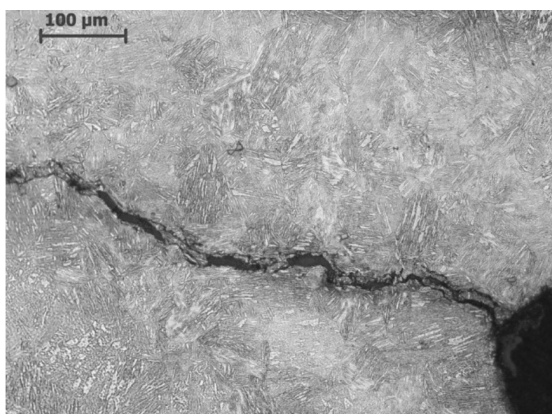


**Rys. 5.** Makrostruktura niezzerwanej próbki implantacyjnej; zgląd metalograficzny poprzeczny, wzdłuż osi napoiny: a) nietrawiony, b) trawiony 4% nitaliem

**Fig. 5.** Uninterrupted implant test sample macrostructure; cross section, along the axis of the weld: a) no-etched b) 4% nital etched

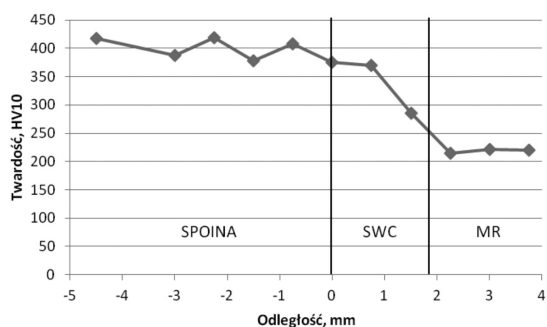


**Rys. 6.** Schodkowy rozwój pęknięcia. Zgląd nietrawiony  
**Fig. 6.** Stepped growth crack. No-etched



**Rys. 7.** Miejsce zarodkowania pęknięcia. Gruboziarnista SWC kołka  
**Fig. 7.** Crack nucleation. Coarsegrain HAZ

Dla niezerwanej próbki wykonanej elektrodą sztucznie wodorowaną, w której przyłożono naprężenie równe 126 MPa, przeprowadzone obserwacje na przekroju poprzecznym wykazały również zarodkowanie pęknięcia o wielkości podkrytycznej, która nie doprowadziła do zerwania kołka (rys. 5÷7). Prawdopodobnym miejscem zarodkowania pęknięcia był obszar gruboziarnistej strefy wpływu ciepła



**Rys. 8.** Rozkład twardości na przekroju poprzecznym niezerwanego kołka spawanego elektrodą w stanie po suszeniu w piecu

**Fig. 8.** Results of hardness measurements on cross section of uninterrupted implant test sample, made by coated electrode after furnace drying

(rys. 7). Rozwijające się pęknięcie propagowało w stronę spoiny krótkimi odcinkami zarówno w płaszczyźnie poziomej, jak i pionowej (rys. 6). Wykonane pomiary twardości wykazały występowanie wartości przekraczających 350HV w spoinie i w wysokotemperaturowej SWC (rys. 8), co wyjaśnia dużą skłonność stali 7CrMoVTiB10-10 do pęknięcia zimnego.

## Podsumowanie i wnioski

Wykonane badania pozwoliły stwierdzić, iż krytyczne naprężenie pęknięcia dla stali 7CrMoVTiB10-10 wynosi 211 MPa i jest istotnie niższe od deklarowanej w normie minimalnej granicy plastyczności. Zwiększenie zawartości wodoru dyfundującego w stopiwie z 5 do 23 ml/100g stopiwa, powodując obniżenie naprężenia krytycznego do wartości 84 MPa. Uzyskane w próbie przełomy charakteryzowały się kruchym międzykrystalicznym lub quasi-kruchym charakterem, z miejscowymi „naderwaniami” na płaskiej powierzchni, charakterystycznymi dla pęknięcia zwłocznego w obecności wodoru.

*Autorzy kierują podziękowania dla p. Adama Gruszczyńskiego z Międzynarodowego Centrum Mikroskopii Elektronowej dla Inżynierii Materiałowej (AGH) za wykonanie zdjęć przełomów na skaningowym mikroskopie elektronowym.  
Badania wykonano w ramach projektu nr 2012/07/N/ST8/00630.*

## Literatura

- [1] E. Tasak, A. Ziewiec: Spawalność materiałów konstrukcyjnych. Tom 1. Spawalność stali, wydawnictwo JAK, Kraków, 2009.
- [2] PN-EN ISO 17642-3: Badania niszczące spoin w metalach - Badania pęknięcia na zimno złączy spawanych - Metody spawania łukowego - Część 3: Badania z obciążeniem zewnętrznym.
- [3] D. Fydrych, J. Tomków, A. Świerczyńska: Determination of diffusible hydrogen content in the deposited metal of rutile electrodes by glycerin method, Metallurgy and Foundry Engineering, Vol. 39, no. 1, (2013), s. 47-53.
- [4] PN-EN 10216:2014: Rury stalowe bez szwu do zastosowań ciśnieniowych - Warunki techniczne dostawy - Część 2: Rury ze stali niestopowych i stopowych z określonymi własnościami w temperaturze podwyższonej.