

# Charakter pęknięcia połączeń spawanych stali 7CrMoVTiB10-10 (T24)

## Character of fracture of welded joints of 7CrMoVTiB10-10 (T24) steel

### Streszczenie

W artykule omówiono pęknięcie połączeń spawanych stali 7CrMoVTiB10-10 (T24), stosowanej na ściany szczelne w kotłach energetycznych, pracujących przy parametrach nadkrytycznych. Jednym z powodów pęknięcia, ze względu na mikrostrukturę materiału spawanego, może być negatywne oddziaływanie wodoru, zarówno podczas spawania, jak i eksploatacji. Stosowanie obróbki cieplnej po spawaniu poprawia właściwości plastyczne złączy, ale może wywoływać również pęknięcie relaksacyjne.

### Abstract

The paper presents the character of fracture of welded joints of 7CrMoVTiB10-10 (T24) steel, used to the membrane walls in power plants boilers operating at supercritical conditions. The cause for the cracking, due to the microstructure of the welded metal, is negative effects of hydrogen content, both during welding and exploitation. Post weld heat treatment improves the plastic properties of joints, but can also cause reheat cracking.

### Wstęp

Ze względu na konieczność stosowania coraz wyższych parametrów eksploatacyjnych bloków energetycznych elektrowni konwencjonalnych niezbędne jest opracowanie i wdrażanie nowych stali zapewniających pracę w tak trudnych warunkach. Przykładem takiej stali może być opracowana w Europie bainityczna, żarowytrzymała stal 7CrMoVTiB10-10 (T24) lub japońska stal 7CrWVMoNb9-6 (T23), które są oparte na

konwencjonalnej stali 10CrMo9-10 (T22) [1]. W tabelicy I zestawiono skład chemiczny stali 10CrMo9-10 (T22), 7CrWVMoNb9-6 (T23) i 7CrMoVTiB10-10 (T24).

### Charakterystyka stali 7CrMoVTiB10-10 (T24)

Analiza danych literaturowych wskazuje liczne zalety stali 7CrMoVTiB10-10, takie jak dobra spawalność, podatność na kształtowanie, brak konieczności podgrzewania wstępnego i obróbki cieplnej po spawaniu metodą TIG i SAW. Praktyka przemysłowa uwidacznia jednak jej dużą skłonność do pęknięć gorących, zimnych i relaksacyjnych [1, 3-5].

Krytyczne opinie co do skłonności do pęknięć stali 7CrMoVTiB10-10 (T24) zawarto w publikacjach m.in. fińskich i czeskich badaczy, gdzie wskazywana jest skłonność do pęknięć zimnych, w tym szczególnie wodorowych [6, 7]. Pęknięcie tego rodzaju zdarza się przy wysokiej zawartości wodoru, podwyższonym stanie naprężeń i mikrostrukturze o twardości > 350 HV.

Najprostszym rozwiązaniem ograniczającym skłonność do pęknięć wodorowych jest obróbka cieplna po spawaniu, która pozwoliłaby uniknąć wszystkich trzech wymienionych czynników. W przypadku stali bainitycznych

Tablica I. Skład chemiczny stali T22, T23 i T24 (% wag.) [2]

Table I. Chemical composition of T22, T23, T24 steels (% mas.) [2]

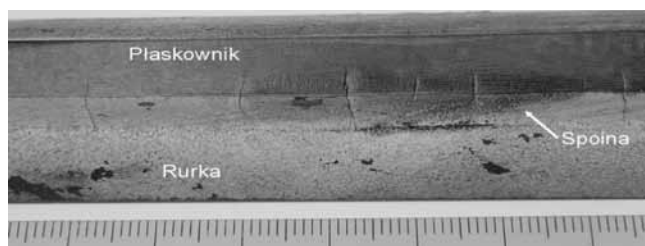
Stal	C	Mn	Cr	Mo	Nb	Ti	V	W	N	B
T22	0,08 +0,14	0,30 +0,70	2,00 +2,25	0,90 +1,10	-	-	-	-	-	-
T23	0,04 +0,10	0,10 +0,60	1,90 +2,60	0,05 +0,30	0,02 +0,08	-	0,20 +0,30	1,45 +1,75	≤ 0,03	0,0005 +0,0060
T24	0,05 +0,10	0,30 +0,70	2,20 +2,60	0,90 +1,10	-	0,05 +0,10	0,20 +0,30	-	≤ 0,01	0,0015 +0,0070

Mgr inż. Krzysztof Pańcikiewicz, prof. dr hab. inż. Edmund Tasak – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

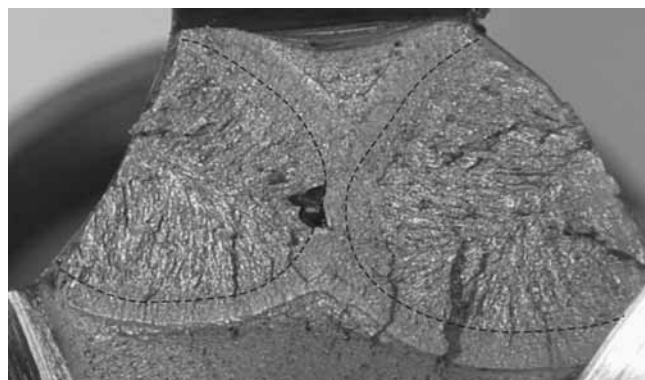
7CrWVMoNb9-6 (T23) i 7CrMoVTiB10-10 (T24) proponowaną temperaturą wyżarzania jest 730÷740°C. Wyżarzanie w niższej temperaturze, co zostało potwierdzone badaniami, może spowodować występowanie efektu twardości wtórnej oraz spadek udarności, ze względu na przemianę austenitu szczytkowego w przesycony ferryt i bainit [8, 9]. W przypadku obróbki cieplnej stali 7CrWVMoNb9-6 (T23) naukowcy japońscy zaproponowali przystanek podczas nagrzewania, co nie znajduje odzwierciedlenia w publikacjach europejskich odnoszących się do tej stali, poza przypadkiem łączenia materiałów o istotnie różnej grubości [3]. Przystanek ten sugeruje podatność stali 7CrWVMoNb9-6 (T23) do pęknięć relaksacyjnych, co również może, ze względu na zbliżony skład chemiczny, dotyczyć stali 7CrMoVTiB10-10 (T24).

## Rodzaj pęknięcia stali 7CrMoVTiB10-10

W przypadku połączeń spawanych stali 7CrMoVTiB10-10 możliwe są pęknięcia różnego typu – począwszy od pęknięć gorących, poprzez pęknięcia zimne wodorowe, aż do pęknięć relaksacyjnych. Skłonność stali do wystąpienia tego typu zjawisk została potwierdzona w badaniach wielu fragmentów paneli ścian szczelnych ze stali 7CrMoVTiB10-10 (T24) spawanych łukiem krytym pod topnikiem. Na rysunku 1 przedstawiono przykład poprzecznych pęknięć spoin, ujawnionych w badaniach magnetyczno-proszkowych wykonanych po 2÷3 dniach, co wskazuje na ich zwłoczny charakter. Rysunek 2 stanowi obraz przykładowej powierzchni pęknięcia występującego w dwóch spoinach połączenia rura-płaskownik. Pęknięcia mogą



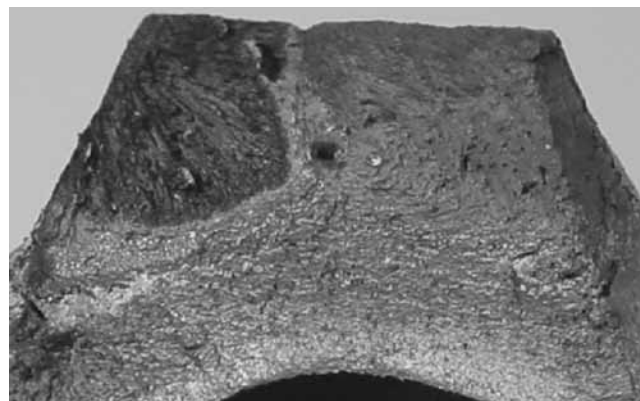
Rys. 1. Pęknięcia poprzeczne płaskownika w ścianie szczelnej  
Fig. 1. Transverse cracks in flat bar of membrane wall



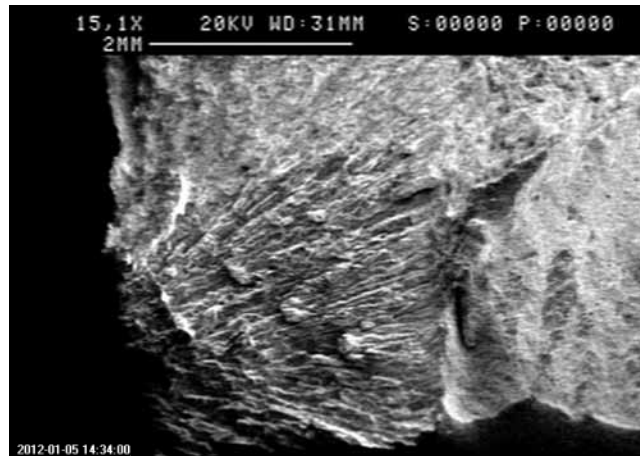
Rys. 2. Pęknięcia poprzeczne w pierwszej i drugiej spoinie  
Fig. 2. Transverse cracks in the first and second weld

również występować tylko w pierwszym ściegu (rys. 3 i 4). Widoczne jest, że pęknięcie powstało w spoinie i gruboziarnistym obszarze strefy wpływu ciepła. Jak wykazały badania makroskopowe, pęknięcie to rozwijało się w pierwszym ściegu. Badania na skaningowym mikroskopie elektronowym wykazały, że elementy te, zgodnie z instrukcją, byłyby poddane obróbce cieplnej po spawaniu, na co wskazuje silne utlenienie powierzchni pęknięcia (rys. 5).

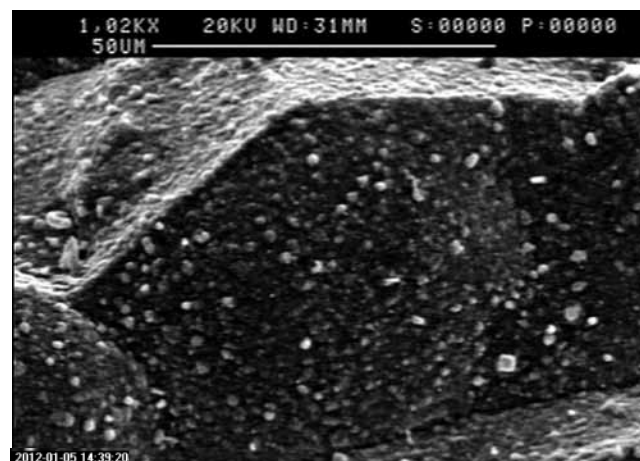
Badania przelomów połączeń spawanych i nie obrabianych cieplnie wykazały, że pęknięcia mają charakter między- i transkryystaliczny. Istotnym zagadnieniem



Rys. 3. Pęknięcie zimne w pierwszym ściegu ujawnione po dołamaniu  
Fig. 3. Cold crack fracture in the first bead of weld



Rys. 4. Pęknięcie zimne w pierwszym ściegu ujawnione po dołamaniu  
Fig. 4. Cold crack fracture in the first bead of weld



Rys. 5. Utleniona powierzchnia pęknięcia  
Fig. 5. Oxidated crack fracture surface

było wyjaśnienie przyczyny i momentu powstawania pęknięć. Sugeruje się, że wystąpienie pęknięć może mieć związek z obecnością dodatkowych naprężeń w czasie przenoszenia masy w połączeniu z wysoką kruchością złącza w stanie bez obróbki cieplnej [5].

Badania połączeń po spawaniu nie wykazały obecności pęknięć, w odróżnieniu od złączy po obróbce cieplnej. Wykonano także badania zginania i rozciągania na próbkach po obróbce cieplnej, a otwarte w ten

sposób pęknięcia poddano analizie na skaningowym mikroskopie elektronowym.

Wcześniejsze badania [10] wykazały, że w spoinie powstają pęknięcia międzykrystaliczne o gładkiej powierzchni przelomu. Ze względu na ich charakter i brak śladów odkształcenia można zaliczyć je do pęknięć gorących, wywoływanych przez dużą zawartość wodoru (rys. 6). Przy wysokim stanie naprężeń i wodoru w spoinie, pęknięcia te mogą się rozwijać jako pęknięcia zimne zwłoczne.

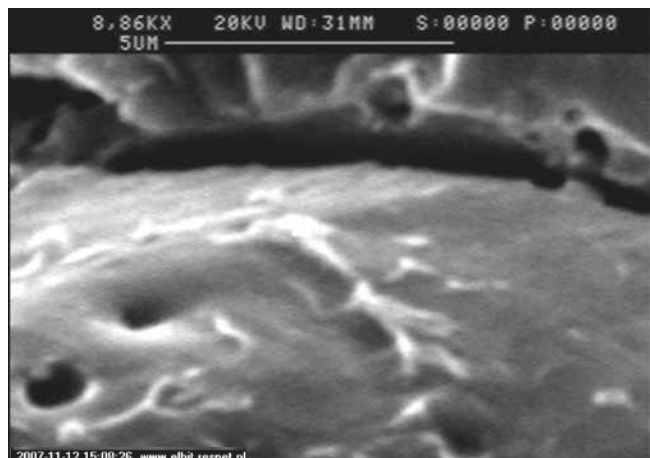
W przypadku stosunkowo niskiego stanu naprężeń pęknięcia zwłoczne wodorowe nie ujawniają się na powierzchni i można je zaobserwować dopiero w dalszych etapach produkcji ścian szczelnych.

Zastosowanie obróbki cieplnej po spawaniu powoduje, że obecność wysokich naprężeń w złączu i brak możliwości ich relaksacji w wyniku wzrostu wytrzymałości spowodowanej utwardzeniem wydzieleniowym prowadzi do pęknięcia relaksacyjnego.

Pęknięcie to charakteryzuje się tym, że w czasie wyżarzania przy granicach ziaren powstaje strefa wolna od wydzieleni o znacznie niższej wytrzymałości niż wewnątrz ziarna, w której zachodzi intensywny proces pełzania wysokotemperaturowego pod wpływem istniejących w złączu naprężeń. Dowodem na postępowanie procesu pełzania są badania strukturalne, wskazujące na występowanie porów na granicach ziaren (rys. 7). Uszkodzenie to występuje tylko w wybranych kierunkach działania naprężeń stycznych (rys. 8).

Aby wyjaśnić rolę wodoru w procesie pęknięcia, podjęto próby badania rodzaju pęknięcia pod wpływem wodoru wprowadzanego do spoiny w sposób elektrochemiczny. W przypadku rozciąganych złączy spawanych, na przelomach występują charakterystyczne *rybie oczy*, składające się z centralnej części, gdzie nastąpiła rekombinacja atomów wodoru i obszaru pęknięcia krucho transkrystalicznego. Na rysunku 9 przedstawiono przykład pęknięcia tego typu.

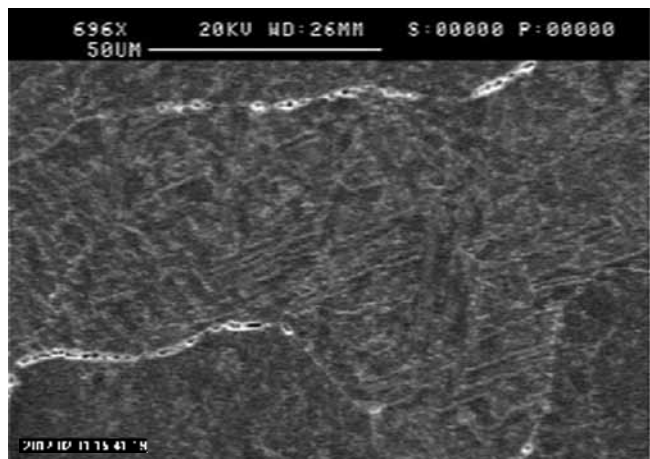
Przeprowadzone badania nie pozwoliły określić momentu powstawania rybich oczu, tzn. czy powstały one w czasie wodorowania, czy też w próbie rozciągania. Problem ten zostanie wyjaśniony w kolejnych badaniach.



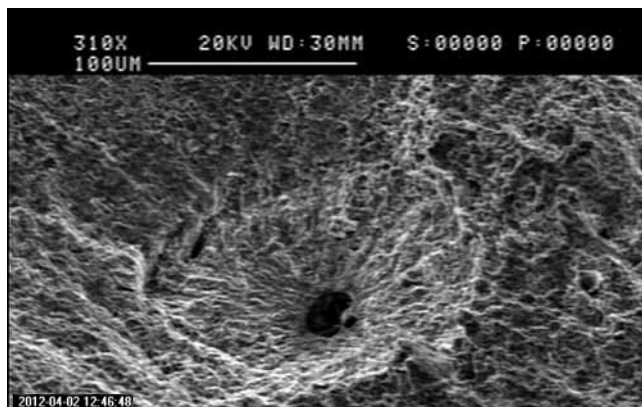
Rys. 6. Pęknięcie gorące spoiny, powstałe podczas spawania  
Fig. 6. Hot crack in weld metal



Rys. 7. Pęknięcia relaksacyjne w spoinie  
Fig. 7. Reheat cracks in weld metal



Rys. 8. Pęknięcia relaksacyjne w spoinie  
Fig. 8. Reheat cracks in weld metal



Rys. 9. Pęknięcie typu *rybie oko* w spoinie stali T24 po procesie elektrolitycznego nawodorowywania

Fig. 9. Fish eye crack in T24 weld metal after cathodic hydrogen charging

## Podsumowanie

Pęknięcia w analizowanych złączach spawanych stali 7CrMoVTiB10-10 (T24) mają charakter międzykrystaliczny i występują najczęściej w pierwszym ściegu. Ujawnianie się ich po pewnym czasie od zakończenia spawania wskazuje na obecność małych niezgodności (mikropęknięć gorących), które rozwijają się przez pękanie zwłoczne. W czasie obróbki

cieplnej drobne mikropęknięcia w spoinach rozwijają się w wyniku pełzania wysokotemperaturowego (relaksacyjnego), a ich powierzchnia ma charakter międzykrystaliczny dołączkowy. Przy wprowadzaniu wodoru z zewnątrz do spoiny powstają pęknięcia typu *rybie oczy*.

## Literatura

- [1] Bendick W., Gabrel J., Hahn B., Vandenberghe B.: New low alloy heat resistant ferritic steels T/P23 and T/P24 for power plant application, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2007, nr 84, s. 13-20.
- [2] PN-EN 10216-2:2009, Rury stalowe bez szwu do zastosowań ciśnieniowych – Warunki techniczne dostawy – Część 2: Rury ze stali niestopowych i stopowych z określonymi właściwościami w temperaturze podwyższonej,
- [3] Heuser H., Jochum C.: Alloy design for similar and dissimilar welding and their behaviours [w:] 1st International Conference Super-High Strength Steels, Rome-Italy, 2-4 November 2005.
- [4] Adamiec J.: Hot cracking of welded joints of the 7CrMoVTiB 10-10 (T/P24) steel, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 22 – Technologies and Properties of Modern Utilised Materials, 2011.
- [5] Gawrysiuk W., Więcek M., Adamiec J.: Spawanie ścian szczelnych wykonanych ze stali T/P24 (7CrMoVTiB10-10). Fakty i Mity, Spawanie w energetyce: XVII międzynarodowa konferencja Opole-Turawa 20-23 kwietnia 2010, Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole 2010, s. 82-87.
- [6] Mohyla P., Koukal J.: Contribution to research of weldability of modern low-alloy creep resistant steels, Acta Metallurgica Slovaca, 2003, nr 9, s. 210-216.
- [7] Nevasmaa P., Laukkaen A.: Procedure for the Prevention of Hydrogen Cracking in Multipass Weld Metal with Emphasis on the Assessment of Cracking Risk in 2.25Cr-1Mo-0.25V-TiB (T24) Boiler Steel, Document IX-2131-04 for the 57th annual assembly of the international institute of welding (IIW), Osaka, Japan, 11-16 July 2004.
- [8] Tasak E., Ziewiec A., Parzych S.: Wpływ obróbki cieplnej na właściwości złącz spawanych wykonanych łukiem krytym i metodą GTAW w stali 7CrMoVTiB10-10, Powerwelding 2011: II konferencja spawalnicza: badania oraz zastosowanie nowych stali żarowytrzymałych dla energetyki w zakresie temperatury pracy 600-650°C, Kroczyce, Ostaniec 8-9 wrzesień 2011, s. 179-188.
- [9] Pańcikiewicz K., Kwiecień S., Tasak E.: Właściwości połączeń spawanych stali 7CrMoVTiB10-10 (T24) po obróbce cieplnej, Przegląd Spawalnictwa, R. 84, Nr 1, 2012, s. 15-17.
- [10] Tasak E., Ziewiec A., Adamiec J.: Wpływ wodoru na pękanie spoin w stalach bainitycznych i mikrostopowych, Hutnik Wiadomości Hutnicze, R. 75, nr 4, 2008, s. 170-176.

Badania wykonano w ramach pracy statutowej 11.11.110.156.

## W następnym numerze

### Marek Blicharski

Zmiany mikrostruktury w połączeniach spawanych różnoimiennych materiałów stosowanych w energetyce.

### Bogusław Cyganek

Wprowadzenie do pomiaru głębi scen za pomocą stereoskopowego układu kamer.

### Anna Pocica

Od parowozu do lux – torpedy. Spawanie gazowe w naprawach taboru kolejowego, część I (z teki Jacka Lassocińskiego).

### Janusz Czuchryj, Sławomir Sikora, Krzysztof Staniszewski

Ocena jakości złączy spawanych w konstrukcjach stalowych kontrolowanych radiograficznie, na podstawie poziomu jakości „B+” wg PN-EN 1090-2.