

Pękanie spoin w stali 7CrMoVTiB10-10 (T24) w czasie spawania, uruchamiania i eksploatacji bloków energetycznych

Cracking in the welds metal
of 7CrMoVTiB10-10 (T24) steel during welding,
commissioning and exploitation of power units

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań przyczyn pęknięcia spoin ze stali 7CrMoVTiB10-10 stosowanej na ściany szczelne kotłów energetycznych odpornych na parametry nadkrytyczne. Ustalono, że pęknięcia powstają w procesie automatycznego spawania łukiem krytym ścian w wytwórni oraz w procesie montażu na budowie, rozruchu i w czasie eksploatacji kotła. Przedstawiono mechanizm pęknięcia spoin na poszczególnych etapach procesu produkcyjnego oraz sposoby unikania pęknięć w czasie spawania łukiem krytym. Uniknięcie pęknięć powstałych w wyniku siarczkowej korozji naprężeniowej (SSC) i pęknięć powstających w czasie eksploatacji jest możliwe dzięki wysokotemperaturowej obróbce cieplnej spoin. Żadne inne sposoby nie gwarantują bezawaryjnej pracy kotłów na parametry nadkrytyczne.

Abstract

The paper presents the results of the research into the reasons of cracking in the welds metal of 7CrMoVTiB10-10 steel used in boilers' membrane walls in supercritical conditions. Cracks are formed at three stages: in the welding of membrane walls in a production plant, during the site assembly process, and finally while commissioning and exploitation of the power plant boiler. The mechanism of cracking and the ways of avoiding cracks during workshop welding were presented. The research shows it is possible to avoid cracks caused by sulfide stress corrosion cracking (SSC) and cracks formed during exploitation after high-temperature heat treatment of welds. Any other methods do not guarantee failure-free exploitation of supercritical power plant boilers.

Wstęp

Zwiększanie efektywności wytwarzania energii elektrycznej jest jedną z praktycznych dróg do rozwiązania problemów związanych z jej niedoborem. Bezpośrednim podejściem do poprawy wydajności jest zwiększenie temperatury systemów wytwarzania energii oraz ciśnienia pary do warunków nadkrytycznych.

Pozwala to nie tylko na zwiększenie sprawności bloków energetycznych, ale również wymiennie przyczynia się do zmniejszenia emisji szkodliwych zanieczyszczeń do atmosfery. Wymaga to jednak stosowania nowych materiałów, które będą mogły pracować w takich warunkach. Przykładem takiego materiału może być stosowana na ściany szczelne kotłów bainityczna stal 7CrMoVTiB10-10, znana również jako T/P24. Stal ta powstała przez modyfikację składu chemicznego klasycznej stali 10CrMo9-10 (T/P22) [1]. Stal dostarczana jest po normalizowaniu i odpuszczaniu, lub w przypadku elementów grubościennych po ulepszeniu cieplnym. Chłodzenie elementów cienkościennych na powietrzu po austenityzacji

Dr inż. Aneta Ziewiec, mgr inż. Krzysztof Pańcikiewicz, prof. dr hab. inż. Edmund Tasak
– AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

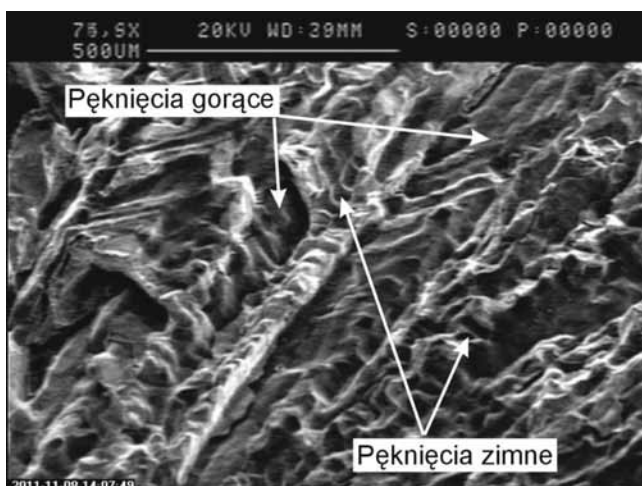
z temperatury $1000\pm 20^{\circ}\text{C}$ umożliwia otrzymanie struktury martenzytyczno-bainitycznej lub bainitycznej. Wysoke odpuszczanie w temperaturze $750\pm 20^{\circ}\text{C}$ pozwala uzyskać materiał o twardości nieprzekraczającej 250 HV10 i umownej granicy plastyczności R_e nie niższej niż 430 MPa [2]. Stal ta charakteryzuje się wysoką czasową wytrzymałością na pełzanie, niewiele ustępującą odporności na pełzanie wysokochromowej stali T/P91 [3]. Badania wykazały jednak, że złącza spawane nie spełniają wymagań normy, tzn. wytrzymałość na rozciąganie próbek wyciętych wzdłuż spoiny jest wyższa, a udarność niższa od wartości określonych w normie [4÷6]. Wysoka wytrzymałość i niska udarność sprawiają, że w procesie wytwarzania szczelnych ścian kotłów spotyka się pęknięcia w złączach spawanych powstające zarówno w czasie spawania automatycznego łukiem krytym w wytwórni, jak i w czasie montażu na budowie i uruchamiania kotła [7÷10].

Celem badań jest wyjaśnienie mechanizmu pęknięcia złączy spawanych i podanie możliwych sposobów zapobiegania pękaniu oraz odpowiedź na pytanie, czy ściany ze stali bainitycznej 7CrMoVTiB10-10 zapewniają bezpieczną pracę kotła o parametrach nadkrytycznych.

Pęknięcie spoin wykonanych łukiem krytym w czasie wytwarzania ścian szczelnych

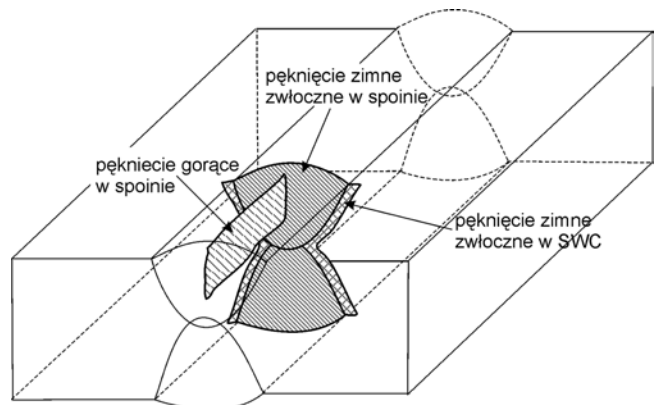
W procesie automatycznego spawania łukiem krytym pod topnikiem rury z płaskownikiem ze stali bainitycznej 7CrMoVTiB10-10 (T24) występują poprzeczne pęknięcia spoin. Pęknięcia te stwierdza się zwykle po pewnym czasie od zakończenia spawania.

Pęknięcia te występują zarówno w pierwszym ściegu jak również spotyka się przypadki pęknięć przez obydwa ściegi [7, 11]. Badania powierzchni przelomu wykazały, że pęknięcia mają charakter kruchy



Rys. 1. Międzykrystaliczny widok powierzchni pęknięcia poprzecznego

Fig. 1. Intercrystalline shape of transverse crack surface



Rys. 2. Schemat mechanizmu pęknięcia zwłocznego spoin w stali 7CrMoVTiB10-10

Fig. 2. Scheme of hydrogen cracking of welds in the 7CrMoVTiB10-10 steel

międzykrystaliczny (rys. 1). Na powierzchni przelomu można wyróżnić obszary pęknięć kruchych zimnych oraz pęknięcia przebiegające po granicach krystalitów wzdłuż osi spoiny, mające cechy pęknięć gorących. O występowaniu pęknięć gorących świadczą zgłady poprzeczne wykonane w pobliżu pęknięcia zimnego, na których stwierdzono obecność pęknięć gorących w osi spoiny [7]. Wcześniejsze badania wykazały, że jednym z czynników zwiększających skłonność do pęknięć gorących jest wodór [7, 11, 12]. W pracach tych przedstawiono również istotne różnice w charakterze międzykrystalicznych przelomów pęknięć gorących i zimnych spowodowanych obecnością wodoru.

Istotnym czynnikiem zwiększającym skłonność do pęknięć gorących jest bor, który znacznie obniża zakres kruchości wysokotemperaturowej. Badania skłonności do pęknięć gorących stali 7CrMoVTiB10-10 wykazały, że zakres kruchości wysokotemperaturowej w warunkach przyłożenia okształceń zewnętrznych dla tej stali wynosi 190°C i krzepnięcie spoin kończy się w temperaturze 1223°C [13]. Przy tak niskiej temperaturze występują już znaczne odkształcenia, które wywołują pęknięcie gorące.

Na podstawie wykonanych badań można przedstawić mechanizm pęknięcia poprzecznego zwłocznego spoin w stali 7CrMoVTiB10-10, pokazany na rysunku 2.

Nadmierna zawartość wodoru w stopiwie wywołuje pęknięcia gorące w osi spoiny [7, 11, 12]. Do powstałych pęknięć dyfunduje wodór. Po ostudzeniu spoiny duża zawartość wodoru w spoinie w obecności rozciągających naprężeń wzdłużnych powoduje pęknięcie zwłoczne zimne. Pęknięcia rozwijają się tylko w spoinie i w strefie wpływu ciepła pierwszego ściegu lub w przypadku dużych naprężeń rozciągających przechodzą do drugiej spoiny.

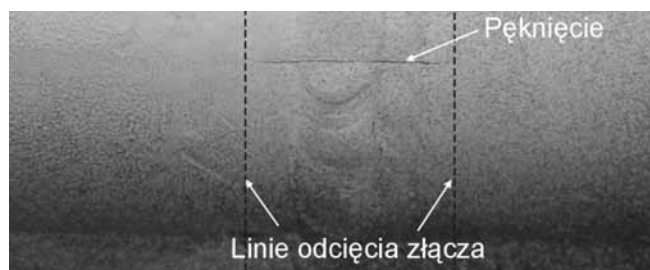
Pęknięcia powstające w czasie spawania ścian szczelnych można wyeliminować przez: dobór optymalnych parametrów spawania, podgrzewanie osuszające krawędzi do temperatury min. 90°C , dokładne wysuszenie topnika, zmniejszenie szybkości chłodzenia po spawaniu za pomocą ceramicznych mat izolacyjnych.

Pęknięcie spoin w czasie prac montażowych na budowie bloku oraz w czasie próby ciśnieniowej

W procesie wytwarzania ścian szczelnych kotłów ze stali 7CrMoVTiB10-10 zdarzają się przypadki nieszczelności instalacji ujawniające się najczęściej w próbie ciśnieniowej. Wcześniejsza kontrola złączy spawanych po ich wykonaniu nie wykazuje niezgodności spawalniczych. W przypadku ujawnienia pęknięć fragmenty ścian z nieszczelnościami są naprawiane metodą wycinania i spawania. Powoduje to niekiedy powstanie dodatkowych niezgodności oraz wprowadza znaczny stan naprężeń powodujący powstanie następnych pęknięć. Przykład pęknięcia złącza doczołowego, którego obecność stwierdzono po próbie ciśnieniowej w czasie rozruchu bloku, pokazano na rysunku 3. Po stronie zewnętrznej pęknięcie miało długość 20 mm. Złącze było wykonane metodą GTAW.

Aby określić wygląd i przyczynę powstania pęknięcia, złącze odcięto z rury wzdłuż linii zaznaczonych na rysunku 3 i dołamano. Wygląd powierzchni dołamanego złącza pokazano na rysunku 4, gdzie zaznaczono również kontur pełnego pęknięcia (kształt eliptyczny). Powierzchnia pęknięcia jest silnie skorodowana, gdyż badanie wykonano po dłuższym czasie od powstania nieszczelności.

Analizując powierzchnię pęknięcia przy powiększeniu 16x, zauważono charakterystyczne linie i prążki wskazujące na kierunki rozchodzenia się pęknięcia. Rysunek 5 przedstawia powierzchnię pęknięcia zimnego, rozwijającego się od grani spoiny w kierunku łoża

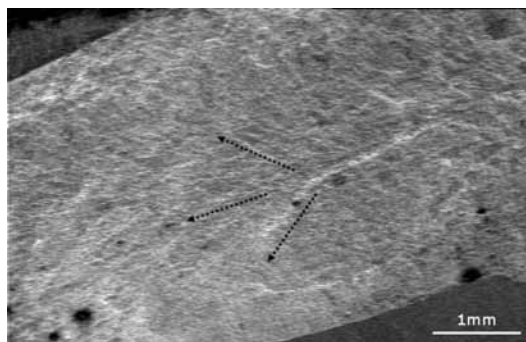


Rys. 3. Wycinek ściany szczelnej z pęknięciem poprzecznym spoiny ujawnionym w badaniach magnetyczno-proszkowych
Fig. 3. Section of boilers' membrane wall with transverse cracking disclosed in magnetic-particle testing

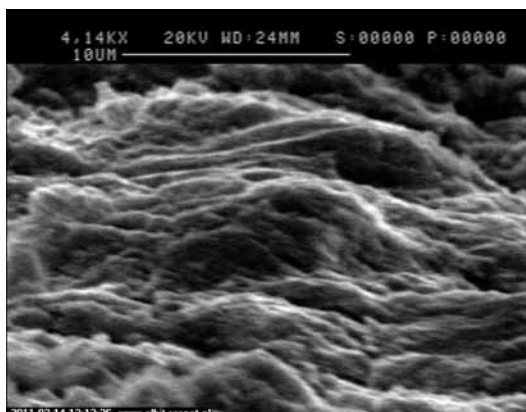


Rys. 4. Powierzchnia pęknięcia po dołamaniu złącza. Pęknięcie o kształcie eliptycznym
Fig. 4. The fracture after cracking of weld. The elliptic shape of the cracking

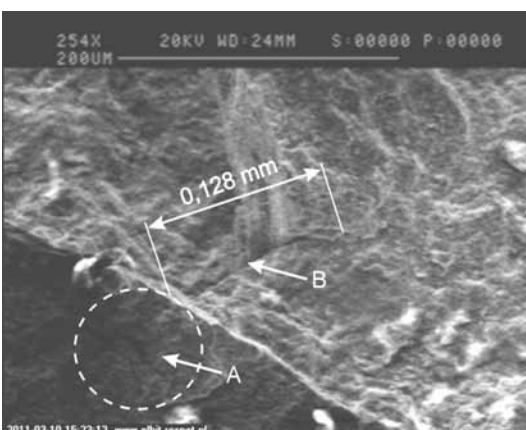
i poprzez SWC do materiału rury. Pęknięcie zachodzi wg mechanizmu kruchego transkrystalicznego. Dowodem na stopniowy rozwój pęknięcia są prążki podobne do prążków zmęczeniowych. Taki charakter powierzchni mają pęknięcia zimne zwłoczne [7, 11, 12]. Powierzchnię pęknięcia w spoinie z widocznymi prążkami pokazano na rysunku 6.



Rys. 5. Powierzchnia pęknięcia zimnego w materiale rodzimym rury (poza spoiną). Strzałkami zaznaczono kierunki rozwoju pęknięcia
Fig. 5. Surface of cold cracking in base material (outside of weld). The arrows shows the crack propagation directions



Rys. 6. Charakterystyczne prążki świadczące o stopniowym rozwoju pęknięcia zimnego
Fig. 6. Characteristic fracture with gradual development of cold cracking

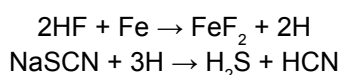


Rys. 7. Najbardziej prawdopodobne miejsca rozpoczęcia pęknięcia w grani spoiny (obszar krateru): A – mikropęknięcia w kraterze, tzw. „pajęczki”, B – mikropęknięcia gorące przebiegające w spoinie graniowej na głębokość poniżej 0,15 mm
Fig. 7. The most probable place of cracking beginning in the root of the weld (crater pipe): A – microcracks in crater pipe, B – hot microcracks in the back weld below 0.15 mm

Szczegółowa analiza najbardziej prawdopodobnego miejsca rozpoczęcia pęknięcia w rejonie grani ujawniła obecność niezgodności spawalniczych w postaci mikropęknięć gorących o rozgałęzionym charakterze i głębokości poniżej 0,15 mm, nazywanych w żargonie spawalniczym „pajęczkami” (rys. 7). Są to typowe mikropęknięcia gorące występujące w kraterze spoiny. Ich wielkość jest jednak poza zdolnością rozdzielczą urządzeń kontrolnych określających jakość spoin.

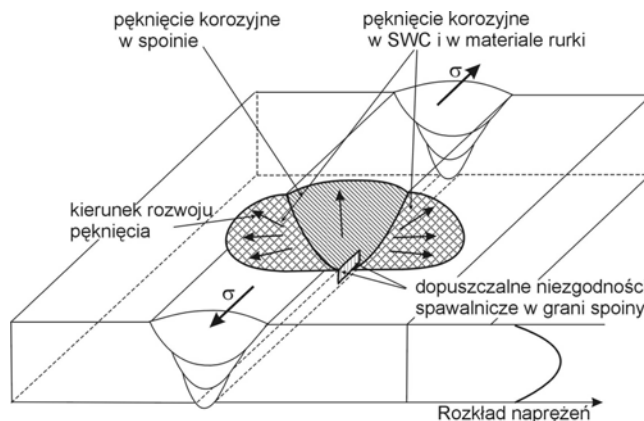
Na podstawie przeprowadzonych badań można przedstawić mechanizm powstawania pęknięć poprzecznych spoin doczołowych ujawnionych w procesie uruchamiania bloku.

Drobne dopuszczalne niezgodności spawalnicze o wielkości poniżej zdolności rozdzielczej urządzeń kontrolnych (nierówności w grani, przyklejenia, mikropęknięcia w kraterze) mogą być miejscami, z których rozpoczyna się pęknięcie opóźnione, wywołane obecnością wodoru i naprężeń. Źródłem wodoru w tym przypadku nie są procesy spawania, ale proces trawienia rur przed uruchomieniem bloku. W mediach trawiących znajdują się cyanki i kwasy, m.in. kwas fluorowodorowy (HF). Związki te, reagując z żelazem i wodorem: dają H_2S i HCN , wywołują korozję naprężeniową siarczkową (SSC) zgodnie z reakcją:



Obecność naprężeń rozciągających i wodoru lub siarkowodoru powoduje wystąpienie korozji naprężeniowej siarczkowej (SSC) II typu [12, 15]. Pęknięcie SSC II typu wystąpi, gdy twardość spoiny lub SWC jest wyższa od 250 HV, poziom naprężeń większy od naprężenia krytycznego oraz zawartość wodoru większa od zawartości krytycznej [12, 15, 17]. Obecność naprężeń rozciągających w spoinie obwodowej jest naturalna, a ich poziom wyliczony metodą MES dla spoiny wzdłużnej ze stali 7CrMoVTiB10-10 wynosi ok. 600 MPa [13, 16]. Naprężenie krytyczne konieczne do wywołania pęknięcia zimnego dla SWC stali 7CrMoVTiB10-10 wynosi ok. 485 MPa [13, 16]. Obecność wodoru w spoinie jest wynikiem procesów trawienia instalacji przed uruchomieniem kotła. Czynniki te sprawiają, że są spełnione warunki do wystąpienia pęknięć zimnych wywołanych pękaniem korozyjnym. Analiza wyników badań pozwala przedstawić schematycznie mechanizm pęknięcia spoin doczołowych rur ze stali 7CrMoVTiB10-10 pokazany na rysunku 8.

Miejszem rozpoczęcia pęknięcia jest najczęściej grani spoiny, w której możliwe jest wystąpienie dopuszczalnych niezgodności spawalniczych. Ponieważ spoina i SWC mają strukturę bainityczną o twardości przekraczającej 250 HV, obecność rozciągających naprężeń obwodowych oraz wodoru powoduje powstanie, a następnie stopniowy rozwój pęknięcia od grani w kierunku lica spoiny oraz strefy



Rys. 8. Mechanizm pęknięcia korozyjnego SSC spoin doczołowych
Fig. 8. SSC corrosion crack mechanism in the butt weld

wplywu ciepła. Pęknięcie ma charakter kruchy. Kierunki jego rozwoju pokazano na rysunku 5. Ma ono charakter eliptyczny, ponieważ w środku grubości ścianki występuje wyższy poziom naprężeń, a zatem pęknięcie rozwija się szybciej. Mechanizm jego powstawania jest taki sam jak pęknięcia korozyjnego SSC II typu opisanego w pracach [12, 14].

Aby zminimalizować problem wystąpienia pęknięcia korozyjnego, należy:

- wykonywać spoinę graniową taką techniką, aby wewnątrz rur ograniczyć ilość nawet dopuszczalnych niezgodności spawalniczych, a szczególnie mikropęknięć w kraterach,
- obrobić cieplnie złącze spawane, tak aby twardość nie przekraczała 250 HV,
- ograniczyć możliwość dostawania się do materiału wodoru powstałego w wyniku trawienia wewnętrznej powierzchni rur przed oddaniem do eksploatacji.

Zmiany właściwości złączy spawanych w procesie obróbki cieplnej

Badania twardości i wytrzymałości prowadzono na złączach pachwinowych. Materiałem do badań były panele ze spoinami pachwinowymi typu rura o średnicy 44,5 x 7,1 mm – płaskownik g = 6 mm, spawane drutem Union S P24 pod topnikiem UV 305 (próbki A) oraz drutem S1CrMo2 pod topnikiem UV 305 (próbki C). Próbki wytrzymałościowe o średnicy 5 mm wycięto wzdłuż spoiny pachwinowej. Twardość badano w spoinie oraz w SWC materiału rury i płaskownika. Próbki wytrzymałościowe oraz próbki do badań twardości poddano obróbce cieplnej w temperaturze 500, 650, 700, 720 i 740°C przez 1 h, a w temperaturze 700, 720 i 740°C także przez 0,5 h. Wyniki badań przedstawiono w pracy [19].

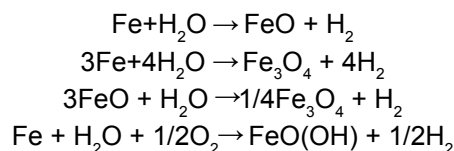
Badania wykazały, że po spawaniu spoiny wykonane zarówno spoiwem Union S P24, jak i Union S1CrMo2 mają twardość w granicach 320÷340 HV10, przy czym rodzaj użytego spoiwa nie wpływa istotnie na twardość spoiny. W SWC zarówno twardość rury, jak i płaskownika twardość po spawaniu przekracza 350 HV10. Obróbka cieplna do temperatury 650°C powoduje wzrost twardości spoiny i SWC do poziomu ok. 380 HV10. Wyżarzanie w temperaturze 700°C przez 0,5 h nie gwarantuje dla wszystkich złączy spawanych obniżenia twardości poniżej 350 HV10. Dopiero obróbka w temperaturze 720°C przez 0,5 h zapewnia obniżenie, twardości poniżej określonego poziomu.

Wzrost twardości spoiny w czasie obróbki cieplnej, zgodnie z oczekiwaniem, powoduje wzrost granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie. Po spawaniu granica plastyczności jest wysoka; dla spoin wykonanych spoiwem Union S P24 wynosi 880 MPa, natomiast dla spoiny wykonanej spoiwem Union S1CrMo2 ok. 760 MPa. Wyżarzanie w temperaturze 500 i 650°C powoduje wzrost granicy plastyczności do wartości ponad 1070 MPa i wytrzymałości na rozciąganie ponad 1119 MPa. Rodzaj spoiwa nie ma większego wpływu na uzyskane wartości granicy plastyczności i wytrzymałości spoin wyżarzonych w temperaturze 650°C. Jest to wynikiem małego (ok. 30%) udziału materiału dodatkowego w spoinie. Po wyżarzeniu w temperaturze 740°C przez 1 h granica plastyczności spoiny wykonanej spoiwem Union S P24 obniża się do 790 MPa, natomiast spoiny wykonanej spoiwem S1CrMo2 – do 750 MPa. Zmiana właściwości wytrzymałościowych wiąże się oczywiście ze zmianą właściwości plastycznych. Praca łamania próbek o grubości 5 mm wyciętych ze spoin po obróbce cieplnej w temperaturze 650°C niezależnie od metody spawania jest bardzo niska: 12 J dla metody 141 i 5 J dla metody 121. Maksymalny wzrost twardości, granicy plastyczności i wytrzymałości oraz spadek wydłużenia i udarności po obróbce cieplnej w temperaturze 650°C jest wynikiem utwardzenia wydzieleniowego.

Przyczyny pęknięcia spoin w czasie eksploatacji kotła

Przedstawione wyniki badań wskazują, że złącza spawane mają wysokie właściwości wytrzymałościowe

i niskie właściwości plastyczne. Stosując parametr Larsena-Millera H_p można wyliczyć, że obróbka cieplna w temperaturze 650°C przez 1 h jest równoważna obróbce cieplnej w temperaturze 550°C przez 7180 h (1 rok = 8760 h), a obróbka cieplna w temperaturze 650°C przez 24 h odpowiada obróbce cieplnej w temp. 550°C przez 9500 h. Przewodząc zatem obróbkę cieplną w wyższej temperaturze, można prognozować właściwości podczas eksploatacji w temperaturze niższej. Należy pamiętać, że jest to duże uproszczenie, bowiem przy obliczeniach nie uwzględnia się procesu pełzania. Prognozowanie właściwości w oparciu o parametr Hollomona-Jaffe wskazuje na wzrost właściwości wytrzymałościowych i spadek właściwości plastycznych przez ponad 1000 h wyżarzania. Dalsze prognozowanie wskazuje, że przez prawie 10 000 h właściwości plastyczne nie są gorsze niż bezpośrednio po spawaniu [19]. Prognozy te potwierdzono w badaniach na próbkach po długotrwałym wyżarzeniu. Wykazano, że po 500 h wyżarzania w temperaturze 550°C twardość z 385 HV10 wzrosła do 400 HV10, a praca łamania spadła z 40 J do poniżej 10 J [18]. Wynika z tego, że przez pierwszy okres eksploatacji złącza spawane nie ulegają odpuszczeniu, a wręcz przeciwnie „utwardzają się” i zwiększają swoją kruchość. Duża granica plastyczności nie pozwala na relaksację naprężeń i wysokie naprężenia spawalnicze sumują się z naprężeniami eksploatacyjnymi. Przy tak wysokim poziomie naprężeń nawet niewielka ilość wodoru prowadzi do pęknięcia wodorowego zwłocznego. Źródłem wodoru w czasie eksploatacji kotła może być utlenianie stali w parze wodnej i tworzenie magnetytu wg reakcji:



Wynika z tego, że złącza spawane ze stali bainitycznej będą pękały w czasie eksploatacji, gdyż są spełnione warunki do powstania pęknięć zimnych zwłoczných, tj. wysoki poziom naprężeń, obecność wodoru i twardość wyższa niż dopuszczalna dla pęknięcia wodorowego 250 HV.

Wniosek

Stal bainityczna 7CrMoVTiB10-10 (T-24) bez obróbki cieplnej złączy spawanych nie nadaje się do budowy ścian szczelnych kotłów i należy zrobić

wszystko, aby w budowanych i planowanych elektrowniach polskich nie wystąpił taki problem z ich uruchomieniem, jak w innych krajach.

Literatura

- [1] Brózda J.: Stale żarowytrzymałe nowej generacji, ich spawalność i właściwości złączy spawanych. Część I. Cel stosowania stali żarowytrzymałych nowej generacji, ich charakterystyka i wynikające właściwości, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa nr 1/2004 s. 41-49.
- [2] PN-EN 10216-2+A2:2009, 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] 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, 84/2007, s. 13-20.
- [4] Tasak E., Ziewiec A., Parzych S.: Wpływ obróbki cieplnej na właściwości złączy spawanych wykonanych łukiem krytym i metodą GTAW w stali 7CrMoVTiB10-10, Materiały II Konferencji Spawalniczej POWERWELDING 2011, Kroczyce Ostatnie wrzesień 2011, s. 179-188.
- [5] M. Zeman, M. Łomozik, J. Brózda: Problemy spawania stali T24 przeznaczonej na ściany szczelne kotłów energetycznych, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, 5/2011, s. 25-31.
- [6] P. Nevasmaa, A. Laukknaen: 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 2004.
- [7] Tasak E., Ziewiec A., Adamiec J.: Rola wodoru w procesie pęknięcia spoin – nowe spojrzenie, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach 2008, 5/2008, s. 138-145.
- [8] Tasak E., Adamiec J., Ziewiec A.: Pęknięcie złączy spawanych stali bainitycznej w gatunku 7CrMoVTiB10-10 (T24), Materiały XVI Międzynarodowej Konferencji „Spawanie w energetyce”, Opole – Jarnołtówek 2008, s. 55-62.
- [9] Adamiec J.: Produkcja paneli ścian szczelnych kotłów z nowej bainitycznej stali 7CrMoVTiB10-10, Spajanie metali i tworzyw w praktyce, 2/2008, s. 14-18.
- [10] Adamiec J., Więcek M., Gawrysiuk W.: Doświadczenia przy spawaniu łukiem krytym paneli ścian szczelnych kotłów z bainitycznej stali 7CrMoVTiB10-10, Materiały XVII Międzynarodowej Konferencji „Spawanie w energetyce”, Opole-Turawa 2010, s. 30-41.
- [11] Tasak E., Ziewiec A., Adamiec J.: Wpływ wodoru na pęknięcie spoin w stalach bainitycznych i mikrostopowych. Hutnik-Wiadomości Hutnicze 2008, t. 75 4, s. 170-176.
- [12] Tasak E., Ziewiec A.: Spawalność materiałów konstrukcyjnych t. 1 Spawalność stali, JAK Kraków 2009.
- [13] Tasak E.: Raport projektu celowego nr 6 ZR7 2008C/07087 „Opracowanie i wdrożenie technologii spawania nowej stali bainitycznej T/P24 (7CrMoVTiB10-10) przeznaczonej na elementy kotłów” AGH Kraków 2010 (niepublikowany).
- [14] Ziewiec A., Tasak E.: Pęknięcie zbiorników i cystern eksploatowanych w wilgotnym gazie LPG zanieczyszczonym siarkowodorem. Przegląd Spawalnictwa nr 11/2009, s. 63-68.
- [15] Ziewiec A., Tasak E.: Pęknięcie stali i spoin eksploatowanych w atmosferze wilgotnego siarkowodoru i wodoru w podwyższonych temperaturach, Hutnik-Wiadomości Hutnicze 2009, t. 76, s. 804-813.
- [16] Ziewiec A., Parzych S., Tasak E.: Skłonność do pęknięć zimnych stali bainitycznej stosowanej do pracy w podwyższonych temperaturach, Hutnik-Wiadomości Hutnicze 2011, t. 78, nr 12, s. 978-981.
- [17] Norma PN-EN ISO 15156-2:2008: Przemysł naftowy, petrochemiczny i gazowniczy. Materiały stosowane przy wydobyciu ropy i gazu w środowisku zawierającym H₂S. Część 2: Stale niestopowe i niskostopowe odporne na pęknięcie oraz stosowanie żeliw.
- [18] Mohyla P., Foldyna V.: Improvement of reliability and creep resistance in advanced low-alloy steels, Materials Science and Engineering A, 2009, vol. 510-511, s. 234-237.
- [19] Pańcikiewicz K., Tasak E., Ziewiec A.: Charakter pęknięcia i właściwości spoin wykonanych łukiem krytym w stali 7CrMoVTiB10-10 Przegląd Spawalnictwa 4/2012.

Badania wykonano w ramach pracy statutowej