

Hodnocení materiálových vlastností svarových spojů pro energetické komponenty pracující za superkritických podmínek pomocí miniaturizovaných vzorků a metodou SPT

Evaluation of Material Properties of Welded Joints for Power Industry Working at Supercritical Conditions Using Miniaturized Specimens and SPT

Ing. Ladislav Kander, Ph.D.; Ing. Šárka Stejskalová; Ing. Petr Čížek, Ph.D.; Ing. Miroslav Filip

MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM, s.r.o., Regionální materiálově technologické výzkumné centrum, Pohraniční 31/639, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

Článek se zabývá možnostmi hodnocení materiálových vlastností svarových spojů tenkostěnných trubek vybraných ocelí přehříváků a superpřehříváků kotlů pracujících s ultrapřehřátou párou (superkritické aplikace – USC). Práce byly zaměřeny na hodnocení svarových spojů trubek ocelí jakosti SUPER 304H, HR3C, TP347HFG a P92. Studium struktury a hodnocení materiálových vlastností bylo provedeno ve stavu po svaření bez tepelného zpracování a ve stavu po svaření a provedeném rozpouštěcím žhání a dále po expozici svarových spojů v reálných provozních podmínkách kotle – v korozním prostředí, pouze při vysoké teplotě bez aplikovaného zatížení. Pro hodnocení změn materiálových vlastností způsobených expozicí byla použita miniaturizovaná zkušební tělesa a penetrační testy (SPT). U exponovaných svarových spojů byl po relativně krátké době expozice prokázán výrazný pokles zejména křehkolomových vlastností, které poklesly přibližně na jednu třetinu hodnot výchozích neexponovaných svarových spojů. Provedené experimenty ukázaly, že jak metodu penetračních testů, tak i hodnocení vlastností pomocí miniaturizovaných těles lze efektivně využít pro kvantifikaci změny úrovně pevnostních a zejména křehkolomových vlastností svarových spojů tenkostěnných trubek pro USC aplikace.

Klíčová slova: oceli pro superkritické parametry; penetrační test; miniaturizovaná tělesa, lomové chování; svarové spoje

The paper deals with the assessment of the material properties of the welded tubes used for re-heaters and super-reheaters working at ultra-super critical parameters (USC). The study was focused on welds of the grades TP347 HFG, Super 304H, HR3C and P92. The assessment of the structure and material properties was made both in state after welding (with PBHT and without PBHT) and after long term exposure of welds in the real working boiler (corrosion medium, high temperature and without any loading). The change of material properties was evaluated both by SPT method and using miniaturized test specimens due to thin tube wall thickness. The one-year exposure of welds in real boiler conditions caused a significant drop of fracture properties (described by either fracture energy of SPT or impact energy of miniaturized Charpy-V specimen) to one third of the value in the state after welding. What concerns mechanical properties represented, both tensile strength and hardness level have increased moderately. The above mentioned changes were observed in all investigated weldments the obtained results show that the SPT method can be successfully used for evaluation of material properties in special applications, such as USC boiler tubes weldments. This method can be used as a useful tool for an assessment of residual service life.

Key words: USC steel; small punch test; miniaturized specimens; fracture behaviour; welded joints

V souvislosti s rozvojem nově budovaných tepelných elektráren pracujících s ultrapřehřátou párou při tzv. ultrakritických parametrech (USC) je věnováno značná pozornost vývoji nových značek ocelí se zvýšenou úrovní užitných vlastností. V rámci mapování materiálových vlastností při vysokých pracovních parametrech byl realizován rozsáhlý projekt, ve kterém byla provedena analýza čtyř vybraných ocelí pro superkritické aplikace (USC). Byla srovnávána změna materiálových charakteristik po základních technologických operacích používaných při výrobě přehříváků a kotlů a následně teplotní expozici při pracovních teplotách. Práce byly

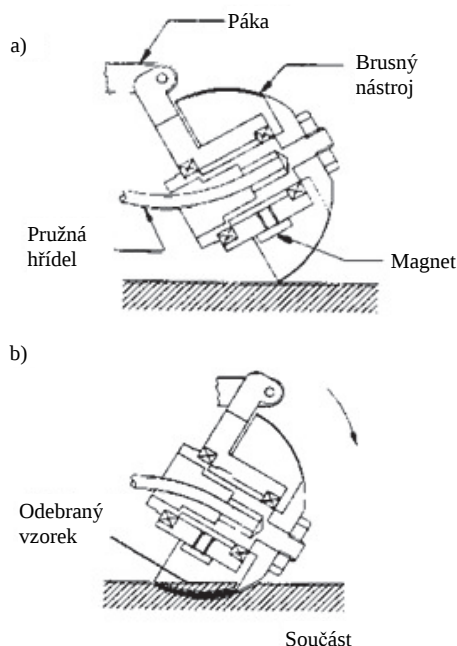
zaměřeny na tyto nové značky austenitických žárupevných ocelí, používaných v moderních USC kotlích: Super 304H, HR3C, TP347HFG a P92 a dále na jejich svarové spoje a ohyby. V tomto příspěvku jsou prezentovány metody a výsledky hodnocení mechanických a křehkolomových vlastností svarových spojů. Zejména s ohledem na velmi malé rozměry hotových svařených dílů bylo hodnocení provedeno pomocí miniaturizovaných zkušebních těles (pro identifikaci mechanických a křehkolomových vlastností) a pomocí penetračních testů (pro měření meze kluzu a meze pevnosti v jednotlivých oblastech svarových spojů) [1].

Metoda small punch test (SPT – penetrační test) je metoda, která umožňuje objektivní hodnocení aktuálních materiálových vlastností za použití minimálního objemu hodnoceného materiálu. Tato metoda je hojně využívána zejména k odběru materiálu z reálně provozovaného provozního dílu, ale lze ji také efektivně použít k hodnocení velmi malých objemů materiálů, jako je svarový kov a tepelně ovlivněná zóna.

Cílem tohoto příspěvku je ukázat možnosti hodnocení aktuálních materiálových vlastností jednotlivých oblastí svarových spojů tenkostěnných trubek pro superkritické aplikace metodou SPT a miniaturizovaných těles.

Princip odběru malých vzorků

Pro odběr experimentálního materiálu z provozovaných komponent se využívá odběrové zařízení SSamTM-2 fy Rolls-Royce, jehož princip činnosti spočívá v odbroušení tenké mezivrstvy materiálu mezi odebíraným vzorkem a zbytkem posuzované součásti pomocí rotujícího nástroje tvaru kloboučku o průměru 50 mm a tloušťce asi 0,7 mm (obr. 1, 2). Pomocí pákového mechanismu je brusný kotouček, který je po obvodu pokryt drtí nitridu bóru nebo diamantu, posunován pomalou rychlostí do záběru. Celý proces odběru, trvající cca 1 – 2 hodiny, umožní získat vzorek experimentálního materiálu tvaru kulového vrchlíku o průměru cca 30 mm a výšce asi 2,5 až 3 mm. Absence tepelného a deformačního ovlivnění odebraného vzorku, jakož i posuzované součásti, je zajištěna vysokou obvodovou rychlostí odběrového nástroje a jeho pomalým posuvem do záběru [2]. Po dokončení odbroušování je vzorek materiálu zachycen pomocí permanentního magnetu, což vzorek ochrání před ztrátou a destrukcí rotujícím nástrojem.



Obr. 1 Princip odběru materiálu pomocí odběrového zařízení SSamTM-2

Fig. 1 Principle of scooping with sampling machine SSamTM-2

Ukázku místa po odběru a odebraný vzorek je možné vidět na obr. 3 a 4. Na takto odebraných vzorcích je standardně proveden kontrolní chemický rozbor a mikrostrukturní analýza spolu s proměřením tvrdosti.



Obr. 2 Odběrové zařízení SSamTM-2 upnuté na posuzovaném zařízení

Fig. 2 The sampling machine SSamTM-2 fixed on the assessed component



Obr. 3 Místo po odběru vzorku odběrovým zařízením SSamTM-2

Fig. 3 Surface after sampling by the sampling machine SSamTM-2



Obr. 4 Experimentální materiál odebraný pomocí odběrového zařízení SSamTM-2

Fig. 4 The test material extracted by the sampling machine SSamTM-2

Odebrané vzorky jsou poté elektrojiskrově rozřezány na planžety o tloušťce cca. 0,7 mm. Z planžet jsou následně vystřiženy polotovary těles pro penetrační testy (obr. 5), které jsou broušením zpracovány na finální rozměr zkušebních disků pro penetrační test [2]. Na základě výsledků zkoušek těchto disků lze stanovit mechanické vlastnosti (mez kluzu, mez pevnosti,

tažnost), přechodovou teplotu FATT a v případech, kdy je to nutné i creepové a únavové vlastností materiálu.



Obr. 5 Zkušební tělesa pro penetrační test prostřížena z odebraného experimentálního materiálu

Fig. 5 Test specimens cut from the removed experimental material for small punch test

Využití metody penetračních testů

Jak již bylo uvedeno výše, metoda penetračních testů je hojně využívána na místech, kde je poměrně složité odebrat vzorek destruktivním způsobem (mosty, ocelové konstrukce, energetické celky, vodní díla apod.) a touto metodou lze vzorek materiálu odebrat přímo na místě provozování komponenty při zachování její funkčnosti a ve většině případů i bez nutnosti následných oprav.

Dalším velkým okruhem použití této metody jsou případy, kdy je potřeba lokalizovat zkušební těleso do velmi úzkého objemu materiálu (oduhlíčené vrstvy, makrosegregace, povlakové vrstvy), konkrétní oblasti svarového spoje (tepelně ovlivněná zóna, svarový kov) nebo návarových vrstev. Metoda se rovněž využívá i na studium různých vlivů, které se podílejí na výsledné degradaci provozované komponenty (změny pevnostních a křehkolomových vlastností po tloušťce stěny u tlustostěnných komponent, změny mechanických vlastností v jednotlivých pásmech tepelně ovlivněné zóny a svarového kovu atd.). U tlustostěnných komponent umožňuje metoda penetračních testů např. hodnocení křehkolomových vlastností jak v různých tloušťkách (vnější povrch, střed, vnitřní povrch) respektujících různé úrovně tangenciálního napětí, tak v různých orientacích zkušebního disku ve stěně komponenty (axiální, tangenciální a radiální směr).

V tomto příspěvku je uveden příklad hodnocení vlastností velmi úzkého objemu materiálu svarových spojů tenkostěnných trubek z austenitických ocelí pomocí metody penetračních testů a miniaturizovaných těles.

Hodnocení vlastností svarových spojů tenkostěnných trubek pro USC aplikace metodou penetračních testů a miniaturizovaných těles

Rozsáhlá analýza materiálů pro zařízení pracující s ultrapřehřátou párou byla provedena na obvodových svarových spojech bezešvých trubek o příčných rozměrech $\varnothing 38 \times 6,3$ mm. Pro analýzu materiálových vlastností byly k dispozici úseky trubek se svarovými spoji o délce cca. 30 mm, což přímo vybízelo k využití metody penetračních testů a miniaturizovaných těles. Cílem předložené analýzy bylo zjistit vliv roční expozice reálného pracovního prostředí USC kotle na materiálové vlastnosti vybraných ocelí a jejich svarových spojů.

Experimentální materiál

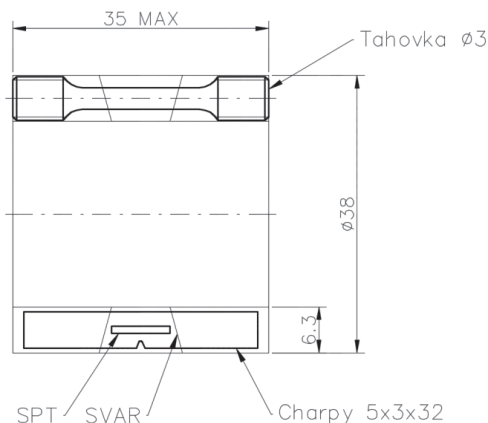
Experimentální materiál představuje celkem 21 kombinací základních materiálů a svarových spojů ocelí Super 304H, HR3C, TP 347 HFG a P92, a to jednak ve stavu přímo po svaření a jednak ve stavu po tepelném zpracování po svaření. Všechny kombinace svarových spojů byly hodnoceny nejprve ve výchozím stavu a poté ve stavu po roční expozici přímo v reálném provozu USC kotle. Všechny svarové spoje byly svařeny metodou 141 (GTAW, resp. TIG) s přídavným materiálem $\varnothing 0,8$ mm UTP A 6170 Co. Tepelné zpracování po svaření bylo v případě austenitických ocelí Super 304H a TP 347 HFG a jejich svarových spojů prováděno při teplotě 1130 °C, u oceli HR3C a jejich svarových spojů při teplotě 1230 °C a v případě oceli P92 a jejich svarů s dalšími ocelmi při teplotě 750 °C [4].

Experimentální program

Hodnocení mechanických vlastností ve výchozím stavu bylo provedeno pomocí miniaturizovaných těles o průměru 3 mm a měřené délce 10 mm. S ohledem na velmi malou délku exponovaných segmentů jednotlivých svarových spojů byla zkušební tělesa pro zkoušku tahem umístěna přes svarový kov tak, aby měřená délka procházela rovnoměrně celým svarovým spojem a zahrnovala rovněž části obou základních materiálů (obr. 6).

Vzorky pro penetrační test byly odebrány ze svarového kovu a základního materiálu po expozici. Pomocí korelací získaných při analýzách na austenitických materiálech stejných značek v letech 2011 – 2013 [1, 2] byly vypočteny hodnoty meze kluzu a meze pevnosti pro základní materiál.

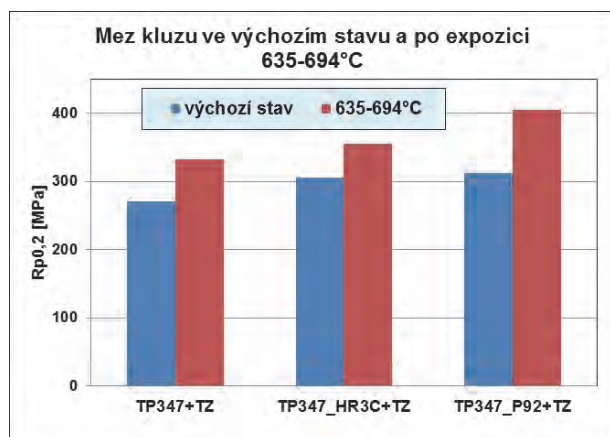
Zkouška rázem v ohybu byla provedena u vzorků svarových spojů ve výchozím stavu a po expozici. Zkouška byla provedena na zkušebních tělesech o rozměrech $3 \times 5 \times 32$ mm s vrubem umístěným do oblasti svarového kovu (obr. 6).



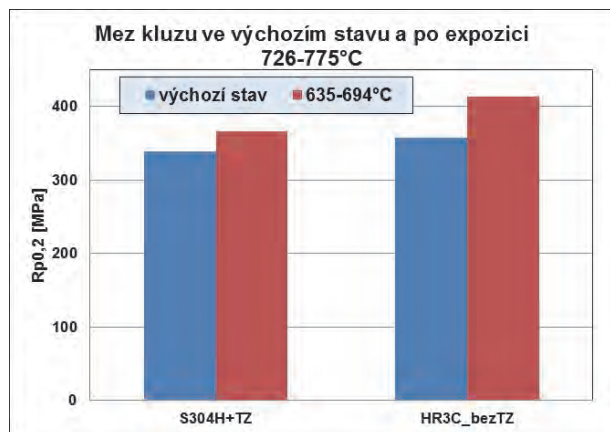
Obr. 6 Umístění zkušebních těles přes svarový spoj
Fig. 6 Location of test specimens over the weld

Vliv roční expozice v reálném pracovním prostředí kotle na materiálové vlastnosti

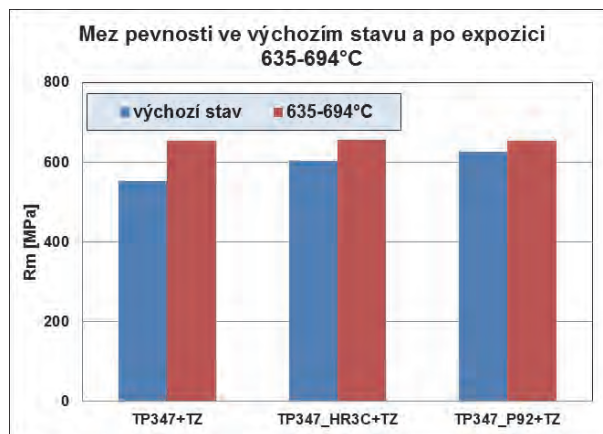
Rozdíly v hodnotách mechanických vlastností ve výchozím stavu a po roční expozici svarových spojů v reálných pracovních podmínkách nebyly velké. U všech hodnocených svarových spojů došlo k mírnému vytvrzení (obr. 7 – 10) [3].



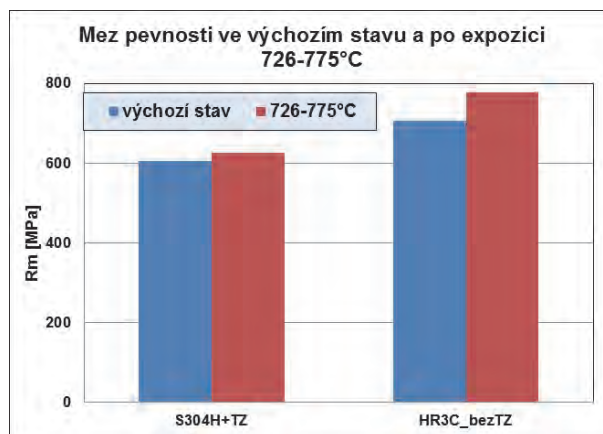
Obr. 7 Vliv expozice na teplotě 635 – 694 °C na mez kluzu
Fig. 7 Effect of exposure at a temperature between 635 – 694 °C on yield stress



Obr. 8 Vliv expozice na teplotě 726 – 775 °C na mez kluzu
Fig. 8 Effect of exposure at a temperature between 726 – 775 °C on yield stress



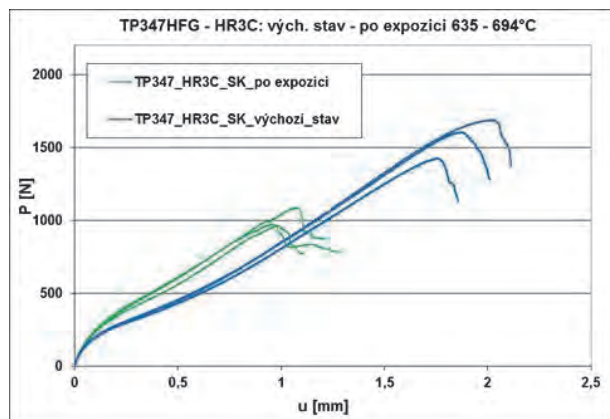
Obr. 9 Vliv expozice na teplotě 635 – 694 °C na mez pevnosti
Fig. 9 Effect of exposure at a temperature between 635 – 694 °C on tensile strength



Obr. 10 Vliv expozice na teplotě 726 – 775 °C na mez pevnosti
Fig. 10 Effect of exposure at a temperature between 726 – 775 °C on tensile strength

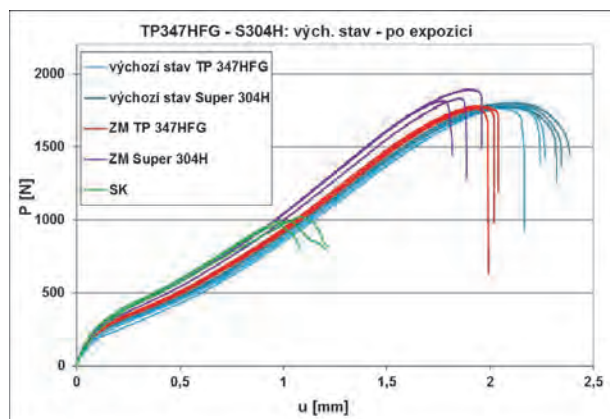
Avšak degradace materiálu analyzovaných svarových spojů se výrazně projevila při hodnocení křehkolomových vlastností, a to jak u výsledků získaných metodou penetračních testů, tak u výsledků z testů miniaturizovaných těles.

Pro ukázkou změny křehkolomových vlastností v důsledku expozice na vysoké teplotě byl vybrán heterogenní svarový spoj TP347HFG-HR3C po expozici v kotli při teplotě 635 – 694 °C. Pokles lomové energie (plocha pod křivkou) u svarového kovu je dokumentován na obr. 11. Úroveň lomové energie klesla po expozici na méně než polovinu hodnoty ve výchozím stavu. Svarový kov potvrdil tak svou pověst nejslabšího článku svarového spoje, což ukazuje i další grafická závislost, kde je zpracován vliv expozice na celý prezentovaný svarový spoj (obr. 12). Je zřejmé, že pokles lomové energie obou základních materiálů je výrazně menší než u svarového kovu.



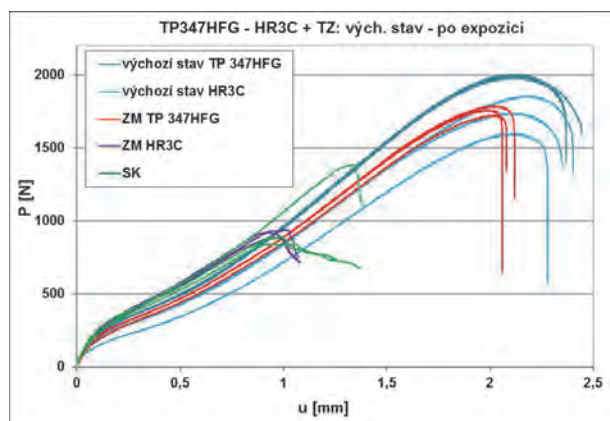
Obr. 11 Vliv expozice na lomovou energii svarového kovu u svaru TP347HFG-HR3C bez TZ

Fig. 11 Effect of long term exposure on fracture energy of dissimilar weld TP347HFG-HR3C without PBHT



Obr. 12 Porovnání lomové energie svarového spoje TP347HFG-HR3C bez TZ ve výchozím stavu a po expozici při teplotě 635 – 694 °C

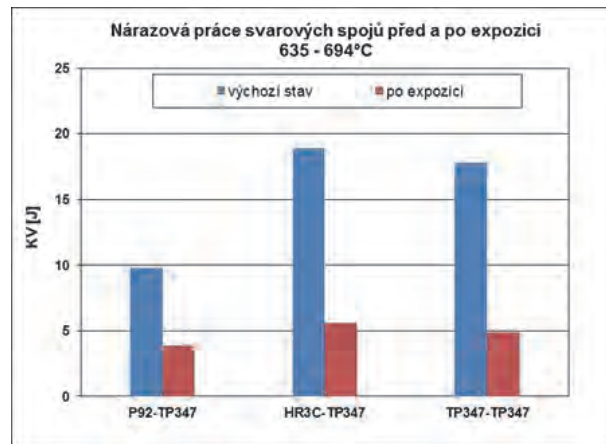
Fig. 12 Comparison of fracture energy of dissimilar weld TP347HFG-HR3C without PBHT after exposure at a temperature between 635 – 694 °C



Obr. 13 Porovnání lomové energie svarového spoje TP347HFG-HR3C + TZ ve výchozím stavu a po expozici při teplotě 635 – 694 °C

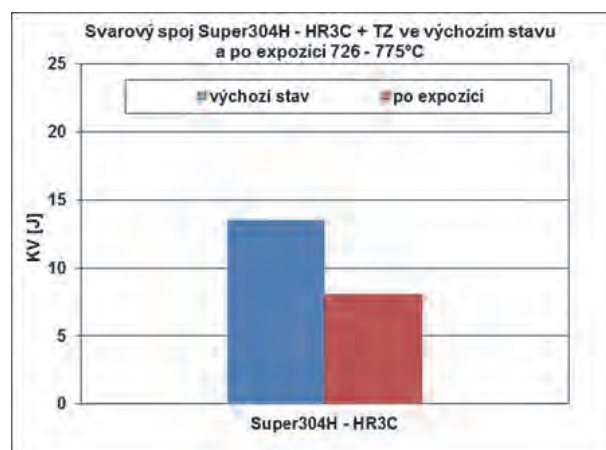
Fig. 13 Comparison of fracture energy of dissimilar weld TP347HFG-HR3C with PBHT after exposure at a temperature between 635 – 694 °C

Degradační účinky expozice vzorků svarových spojů na pracovní teplotě korozního prostředí se projevily výrazně také na křehkolomových vlastnostech svarových spojů, kdy hodnota nárazové práce svarových kovů se oproti výchozímu stavu snížila přibližně na 1/3 původní hodnoty (obr. 13).



Obr. 14 Vliv expozice na pracovní teplotě 635 – 694 °C v korozním prostředí na nárazovou práci

Fig. 14 Effect of exposure at a temperature between 635 – 694 °C on fracture energy



Obr. 15 Vliv expozice na pracovní teplotě 726 – 775 °C v korozním prostředí na nárazovou práci

Fig. 15 Effect of exposure at a temperature between 726 – 775 °C on fracture energy

Diskuse

S ohledem na velikost exponovaných svarových spojů v reálném kotlovém tělese nebylo možné provést hodnocení mechanických a křehkolomových vlastností standardními zkušebními tělesy, tudíž byly využity metody hodnocení miniaturizovanými zkušebními tělesy a metoda penetračních testů. Použití metody penetračních testů umožnilo stanovení rozdílů v úrovni lomové energie svarového kovu a základního materiálu před a po expozici. Metoda penetračních testů, na rozdíl od výsledků zkoušek tahem, pak indikovala výrazný

pokles křehkolomových vlastností hodnocených lokalit ve svaru. Hodnocení ukázalo, že kritickým místem všech svarových spojů se jednoznačně jeví svarový kov, kde hodnoty lomové energie svarového kovu po expozici dosahují maximálně 50 % lomové energie základního materiálu, a to bez ohledu na skutečnost, zda bylo nebo nebylo aplikováno u dotyčného svarového spoje rozpouštěcí žihání. Poměrně překvapivým faktem je, že samotná expozice po dobu jednoho roku v reálném kotlovém tělese se projevila na materiálových vlastnostech svarových spojů poměrně intenzivní degradací zejména křehkolomových vlastností. K tomu je nutné zdůraznit, že se jednalo o expozici bez zatížení vnitřním přetlakem, tedy pouze o materiál vystavený pracovní teplotě a koroznímu médiu. Získaná data poměrně výrazně modifikují představu o časové ose probíhající degradací procesů v těchto speciálních materiálech pro USC parametry.

Závěr

Príspevek se zabývá studiem vlivu některých technologických faktorů na strukturu a vlastnosti vybraných svarových spojů USC ocelí na jejich degradaci v důsledku dlouhodobé expozice při pracovních teplotách a rovněž možností využití metody penetračních testů pro stanovení aktuálních pevnostních a křehkolomových vlastností svarových spojů používaných pro superkritické aplikace. Experimentální práce spolehlivě prokázaly, že již dlouhodobá expozice po dobu 1 roku v praktických podmínkách reálně provozovaného kotle

při teplotách 635 až 694 °C, resp. 726 až 775 °C prokázala významný pokles křehkolomových vlastností charakterizovaných buď energií penetračního testu nebo absorbovanou energií miniaturizovaného Charpy-V tělesa při mírném nárůstu pevnostních charakteristik. Křehkolomové vlastnosti poklesly přibližně na jednu třetinu hodnot výchozích neexponovaných svarových spojů.

Príspevek ukazuje aplikační potenciál metody penetračních testů, kterou lze efektivně využít při kvantifikaci poklesu úrovně pevnostních a zejména křehkolomových vlastností svarových spojů materiálů pro USC aplikace.

Poděkování

Tato práce vznikla při řešení projektu č. LO1203 „Regionální materiálové technologické výzkumné centrum - program udržitelnosti“ financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Literatura

- [1] STEJSKALOVÁ, Š., KANDER, L. aj. *Studium změn mechanických vlastností a struktury svarových spojů trubek z austenitických ocelí po expozici v korozním prostředí*. (Technická zpráva T-46/2014, Ostrava: Materiálový a metalurgický výzkum, s.r.o., září 2014.
- [2] Small Punch Test Method for Metallic Materials. CEN WORKSHOP AGREEMENT CWA 15627, December 2007.
- [3] KANDER, L., STEJSKALOVÁ, Š. aj. *Hodnocení mechanických vlastností svarových spojů trubek z austenitických ocelí ve výchozím stavu*. (Nepublikované výsledky) Ostrava: Materiálový a metalurgický výzkum, s.r.o., duben 2015.

Představení společnosti Asociace výzkumných organizací

Vznik

AVO – Asociace výzkumných organizací vznikla v červnu roku 1990 v Brně. Formálně pak byla registrována Ministerstvem vnitra ČR dne 25. července 1990. Založením asociace vzniklo v tehdejší ČSFR vůbec první celostátní sdružení na občanských demokratických principech v oblasti vědy, technologií a inovačního podnikání po listopadu 1989.

Právní forma

Asociace je založena na základě zákona č. 83/1990 Sb. (od 1. 1. 2014 nahrazen zákonem č. 89/2012 Sb.) jako dobrovolné, nepolitické sdružení právnických a fyzických osob, které se zabývají výzkumem a vývojem nebo mají s touto činností společné zájmy.

Poslání

AVO je jediným sdružením v ČR, které reprezentuje aplikovaný výzkum a vývoj v podnikatelské sféře, tedy výzkum rozvíjený a provozovaný převážně z privátních zdrojů a mimo sektor Akademie věd a vysokých škol. Cílem činnosti asociace je především hájení zájmů aplikovaného výzkumu a vývoje, poskytování odborných informací, poradenských služeb a vyvíjení činnosti k prosazování příznivé image aplikovaného výzkumu u laické i odborné veřejnosti.

Počet členů

V současné době sdružuje asociace celkem 83 členů (75 právnických a 8 fyzických osob).

AVO

Asociace výzkumných organizací

The Association of Research Organizations

Sídlo
Novodvorská 994, 142 21 Praha 4

Telefon
+420 239 041 998

E-mail
avo@avo.cz

Web
www.avo.cz

Sociální sítě
www.avobloguje.wordpress.com
www.facebook.com/science2S
www.twitter.com/AVOtweetuje
www.youtube.com/AVOvidea

IČ
00546151

