

Empirické korelace pro odhad lomové houževnatosti J_{IC} z výsledků penetračních testů

Empirical Correlations for Estimation of Fracture Toughness J_{IC} from the Results of Penetration Tests

prof. Ing. Karel Matocha, CSc.; Ing. Gabriela Rožnovská

MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Pohraniční 693/31, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

Pro odhad lomové houževnatosti J_{IC} z výsledků penetračních testů je možno dle CWA 15627 (CEN Workshop Agreement) „Small Punch Test Method for Metallic Materials“ použít dva přístupy:

- 1. přímý odhad lomové houževnatosti z výsledků penetračních testů a empiricky stanovených korelací mezi výsledky standardizovaných zkoušek lomové houževnatosti a efektivní lomovou deformací,*
- 2. EPRI-FAA inovovaný přístup, který je založen na analýze výsledků penetračního testu a stanovení hustoty deformační energie odpovídající iniciaci trhliny při penetračním testu. Použití tohoto přístupu vyžaduje v průběhu penetračního testu snímat nejen závislost zatížení – posunutí razníku, ale i monitorovat povrch zkušební tělesa a identifikovat okamžik iniciace trhliny.*

V předloženém příspěvku byl studován vliv typu materiálu a normy použité pro stanovení lomové houževnatosti z J-R křivek na empirické korelace mezi výsledky standardizovaných zkoušek lomové houževnatosti a efektivní lomovou deformací ε_f pro oceli 14MoV6-3, P91 a P92 v neprovozovaném stavu. Získané výsledky prokázaly, že empirické korelace závisí na typu materiálu a jsou významně ovlivněny normou použitou pro stanovení lomové houževnatosti.

Klíčová slova: *penetrační test; lomová houževnatost; empirická korelace; lomová deformace ε_f ; minimální tloušťka porušeného vzorku h_f*

Two approaches may be used to estimate the material fracture toughness J_{IC} by Small Punch tests according to CWA 15627 (CEN Workshop Agreement) „Small Punch Test Method for Metallic Materials“.

- 1. Estimation of fracture toughness from the results of penetration and empirical correlations between result of standardized fracture toughness tests and effective fracture deformation*
- 2. EPRI-FAA based on analysis of the SP test results and determination of the strain energy density corresponding to crack initiation in the small punch test. The use of this approach requires not only recording the load - punch displacement curve but also monitoring of the specimen surface for identification of the crack initiation during SP test.*

In the present paper, the effect of type of material and standard used for determination of fracture toughness from J-R curves on empirical correlations between results of standardized fracture tests and effective fracture deformation was studied for 14MoV6-3, P91 and P92 steels in the as-received state. Results obtained proved that empirical correlations depend on the type of material and that they are significantly affected by the standard used for determination of fracture toughness.

Key words: *penetration test; fracture toughness; empirical correlation; fracture deformation ε_f ; minimal thickness of the failed specimen h_f*

Provozní spolehlivost a integrita tlustostěnných komponent energetických zařízení pracujících za vysokých teplot a tlaků je významně ovlivněna úrovní lomové houževnatosti použitých materiálů. Snaha o prodloužení projektované životnosti dlouhodobě provozovaných energetických zařízení je nemyslitelná bez znalosti jejich aktuální zbytkové životnosti. Kvalifikované posuzování zbytkové životnosti vyžaduje znalost aktuální

úrovně mechanických charakteristik (meze kluzu, meze pevnosti, DBTT, resp. lomové houževnatosti) použitých materiálů, příp. stupně jejich degradace při minimalizaci objemu zkušebního materiálu odebíraného z posuzované součásti [1].

Použití standardizovaných postupů pro stanovení aktuální lomové houževnatosti materiálu vyžaduje velký

zásah do integrity provozovaného zařízení, který je vyvolaný potřebou odběru poměrně velkého množství zkušebního materiálu [2, 3]. Následně opravy svařování však mohou být zdrojem zvýšeného výskytu poškození. V září roku 2004 inicioval Evropský výbor pro normalizaci (CEN) vznik dokumentu CWA 15627 (CEN Workshop Agreement) „Small Punch Test Method for Metallic Materials“ [4]. CWA je technická dohoda (doporučení) v rámci CEN a vlastněná CEN jako publikace, která odráží konsenzus konkrétních expertů a organizací odpovědných za její obsah. CWA proto reprezentuje nižší úroveň konsenzu, než jakou představuje evropská norma. CWA 15627 [5] je rozdělena do dvou samostatných částí:

- Part A: A Code of Practice for Small Punch Creep Testing.
- Part B: A Code of Practice for Small Punch Testing for Tensile and Fracture Behaviour. Part B contains also ANNEX B1: „Derivation of tensile and fracture material properties“ and ANNEX B2: „Guidance on relevant technological issues: specimens sampling from components“.

Požadavek minimalizace zkušebního materiálu odebíraného z posuzovaného zařízení je možno zajistit „nedestruktivním“ odběrem vzorku materiálu buď mechanickým odbroušením [4, 6], nebo elektrojiskrovým řezáním [4, 5]. Mechanické vlastnosti materiálu jsou následně stanovovány pomocí penetračních testů pokud možno na zkušebních tělesech tvaru disku o průměru 8 mm a tloušťce 0,5 mm [4].

Pro případy, kdy lomové chování konstrukčních ocelí je popsáno parametry elasto-plastické lomové mechaniky, je možno pro odhad lomové houževnatosti J_{IC} použít dva přístupy [4]:

1. přímý odhad lomové houževnatosti z výsledků penetračních testů na základě znalosti empiricky stanovených korelací mezi lomovou houževnatostí stanovenou standardizovanými postupy [2, 3] a lomovou deformací penetračního testu ε_f [4, 5],
2. EPRI-FAA inovovaný přístup.

Přístup navržený pro EPRI společností FAA (Failure Analysis Associates, Inc.) hodnotí lomové chování na základě hustoty deformační energie potřebné pro iniciaci trhliny při penetračním testu. Postup použitý pro stanovení lomové houževnatosti materiálu z výsledku jednoho penetračního testu je následující:

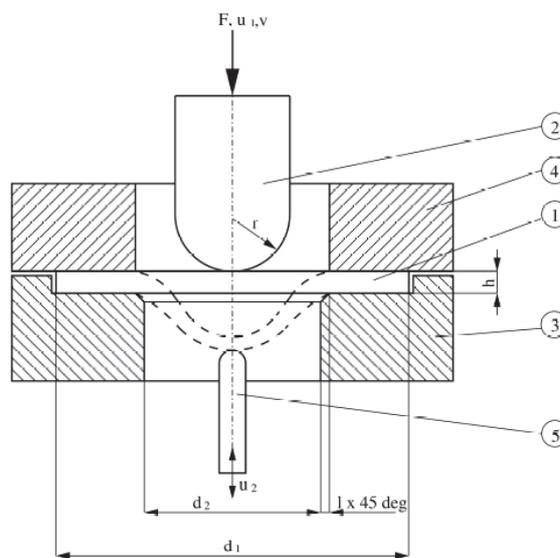
- záznam závislosti zatížení – posunutí razníku při současném monitorování povrchu zkušebního tělesa pro identifikaci okamžiku iniciace trhliny,

- stanovení závislosti $\sigma - \varepsilon$ pro tahovou zkoušku ze závislosti zatížení – posunutí razníku získané v průběhu penetračního testu,
- stanovení hustoty deformační energie odpovídající iniciaci trhliny při penetračním testu,
- stanovení lomové houževnatosti J_{IC} z odhadu síly, při které je dosaženo kritické hustoty deformační energie na čele trhliny u standardizovaného zkušebního tělesa pro stanovení lomové houževnatosti.

V předloženém příspěvku je uveden princip penetračního testu, postup pro stanovení efektivní lomové deformace ε_f a empiricky stanovené korelace $J - \varepsilon_f$ pro materiál neprovozovaných trubek z oceli 14MoV6-3, P91 a P92.

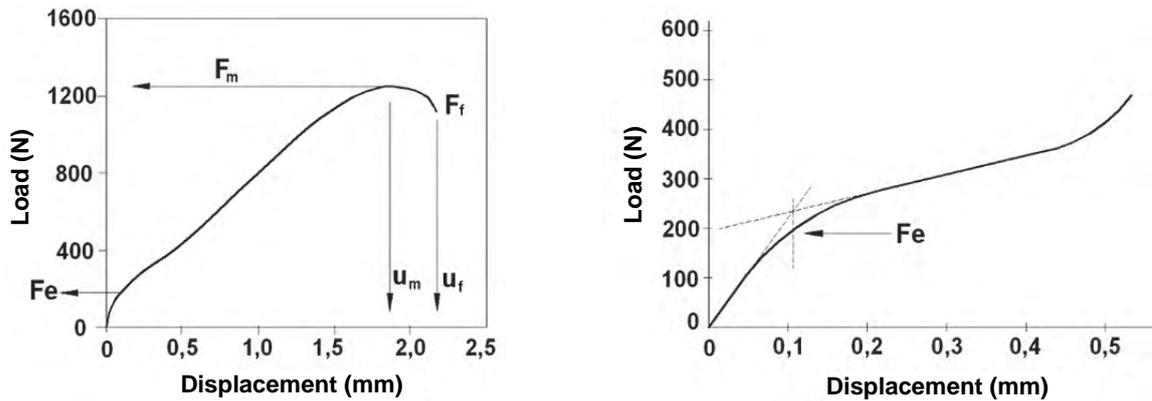
1. Princip penetračního testu

Princip penetračního testu spočívá v průniku razníku s hemisférickou plochou přes plochý vzorek tvaru disku, který je sevřen mezi spodní opěrnou a horní přítlačnou maticí (obr. 1). V průběhu testu je snímána závislost síla – posunutí (posunutí příčnicku zatěžovacího stroje, posunutí razníku a/nebo průhyb vzorku měřený v ose zkušebního disku na jeho protilehlé straně), jak znázorňuje obr. 2.



Obr. 1 Princip penetračního testu (1- zkušební těleso tvaru disku, 2 - razník, 3 - spodní opěrná matice, 4 - horní přítlačná matice, 5 - snímač průhybu) [4]

Fig. 1 Principle of penetration test (1 - specimen, 2 - receiving die, 4 - clamping die, 5 - deflection measurement rod) [4]



Obr. 2 Závislost zatížení – posunutí razníku snímaná v průběhu penetračního testu
Fig. 2 Load - displacement dependence recorded during a small punch test

Z výše uvedené závislosti a porušeného zkušební tělesa jsou stanovovány následující charakteristiky používané pro odhad pevnostních charakteristik a lomového chování materiálů:

- F_e (N) síla charakterizující přechod z linearit do stádia spojovaného s rozvojem plastické deformace přes tloušťku vzorku (plastic bending stage),
- F_m (N) maximální síla zaznamenaná v průběhu penetračního testu,
- u_m (mm) posunutí odpovídající F_m ,
- u_f (mm) posunutí razníku odpovídající porušení zkušební tělesa, které smluvně odpovídá 20% poklesu maximální síly v průběhu penetračního testu ($F_f = 0,8 \cdot F_m$),
- E^{SP} (J) lomová energie vypočtená z plochy pod křivkou síly – posunutí razníku až do okamžiku porušení tělesa u_f ,
- ε_f (1) $\varepsilon_f = \ln(h_o/h_f)$ – efektivní lomová deformace, kde h_o je počáteční tloušťka vzorku a h_f je minimální tloušťka porušeného vzorku.

2. Přímý odhad lomové houževnatosti z výsledků penetračních testů

Pro případy, kdy je lomové chování konstrukčních ocelí popsáno parametry elasto-plastické lomové mechaniky, byla v práci [7] odvozena závislost mezi J_{IC} a ekvivalentní lomovou deformací ε_f . Hodnota J_{IC} je korelována s lomovou deformací vzorku ε_f pomocí vztahu

$$J_{IC} = k \cdot \varepsilon_f - J_o, \quad (1)$$

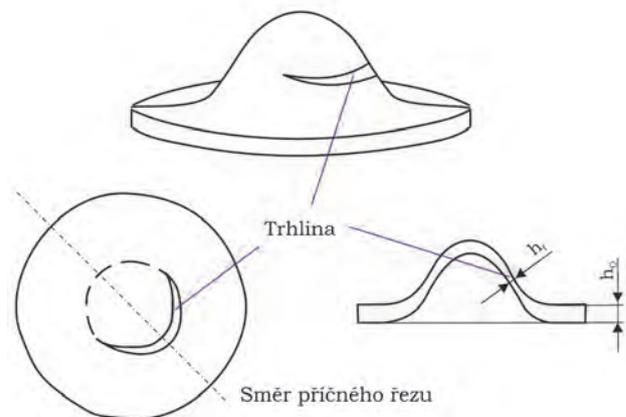
kde k a J_o jsou empiricky stanovené konstanty.

Efektivní lomová deformace ε_f je vyjádřena vztahem

$$\varepsilon_f = \ln \left(\frac{h_o}{h_f} \right). \quad (2)$$

kde h_o je počáteční tloušťka zkušebního disku, h_f je minimální tloušťka disku v místě jeho porušení.

Lineární vztah mezi lomovou houževnatostí a efektivní lomovou deformací podle rov. (1) byl použit pro stanovení empirické korelace v řadě prací [8 – 15]. Každý z autorů však odvodil ze získaných výsledků svoji vlastní empirickou korelaci. Je tedy evidentní, že efektivní lomová deformace je významně ovlivněna tloušťkou a průměrem penetračního disku, průměrem razníku, rozměry zkušební přípravku a typem materiálu. Postup pro stanovení minimální tloušťky porušeného penetračního disku h_f uvedený v CWA 15627 [4] je znázorněn na obr. 3.



Obr. 3 Postup při stanovení minimální tloušťky porušeného vzorku h_f [4]

Fig. 3 Procedure for determination of minimal thickness of failure specimen h_f [4]

3. Experimentální materiál

Jako experimentální materiál byla použita trubka z oceli 14MoV6-3 ($\varnothing 457 \times 28$ mm) v neprovozovaném stavu a po expozici 151062 hodin na teplotě 540 °C a trubky z oceli P91 ($\varnothing 272 \times 32$ mm) a z P92 ($\varnothing 219 \times 22,2$ mm) v neprovozovaném stavu. Všechny trubky byly vyrobeny ve VT TŽ, a.s. Pro stanovení korelační závislosti mezi lomovou houževnatostí a ekvivalentní lomovou deformací ε_f byl materiál neprovozované trubky z oceli 14MoV6-3 tepelně přepracován 5 režimy, které umož-

nily získat mechanické vlastnosti v co nejširším rozmezí (viz tab. 1). Materiály neprovozovaných trubek z ocelí P92 a P91 byly z téhož důvodu přepracovány třemi režimy tepelného zpracování (viz tab. 2 a tab. 3).

Tab. 1 Výsledky zkoušek tahem při laboratorní teplotě materiálu 14MoV6-3

Tab. 1 Results of tensile tests at laboratory temperature of the material 14MoV6-3

Materiál	Tepelné zpracování	R_{eL}	R_m	A	Z
		(MPa)		(%)	
Dodaný stav		350	492	31,8	81
po TZ1	940 °C/1 hod./voda + 720 °C/2 hod./vzduch	664	725	24,7	78
po TZ2	940 °C/1 hod./pec + 720 °C/2 hod./vzduch	319	462	25,6	78
po TZ3	940 °C/1 hod./olej + 720 °C/2 hod./vzduch	616	701	25,5	77
po TZ4	940 °C/1 hod./vzduch + 720 °C/2 hod./vzduch	403	536	30,3	83
po TZ5	940 °C/1 hod./vzduch + 700 °C/2 hod./vzduch	426	554	30,0	81
po 151 062 hod. na teplotě 540 °C		292	494	32,0	76

Tab. 2 Výsledky zkoušek tahem při laboratorní teplotě materiálu P92

Tab. 2 Results of tensile tests at laboratory temperature of the material P92

Materiál	Tepelné zpracování	R_{eL}	R_m	A	Z
		(MPa)		(%)	
Dodaný stav		669	805	21,5	65
po TZ1	780 °C/2 hod./vzduch	522	697	26,2	70
po TZ2	760 °C/2 hod./vzduch	541	709	23,1	69
po TZ4	800 °C/2 hod./vzduch	511	686	22,2	63

Tab. 3 Výsledky zkoušek tahem při laboratorní teplotě materiálu P91

Tab. 3 Results of tensile tests at laboratory temperature of the material P91

Materiál	Tepelné zpracování	R_{eL}	R_m	A	Z
		(MPa)		(%)	
Dodaný stav		741	859	19,4	64
po TZ1	780 °C/2 hod./vzduch	498	669	25,9	71
po TZ2	760 °C/2 hod./vzduch	572	718	24,3	71
po TZ4	750 °C/45 min./vzduch	616	753	23,5	72

4. Experimentální výsledky

4.1 Stanovení lomové houževnatosti při pokojové teplotě

Charakteristickým znakem lomového chování oceli 14MoV6-3, P92 i P91 při pokojové teplotě je stabilní růst tvárné trhliny. Z tohoto důvodu byly u materiálů v dodaném stavu a po všech tepelných zpracováních stanoveny R křivky dle [2] metodou více zkušebních těles. Zkoušky byly prováděny na zkušebních tělesech CT o tloušťce $B = 20$ mm a šířce $W = 40$ mm. Jednotlivá zkušební tělesa byla zatěžována na zkušebním zařízení MTS 500 kN v režimu konstantní rychlosti pohybu pístnice $0,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. V průběhu každé zkoušky byla zaznamenána závislost síla – posunutí síly v ose zatěžování. Na základě změřených závislostí síla – posunutí síly byly vypočteny hodnoty J -integrálů. Pro stanovení stabilního růstu trhliny Δa v průběhu každé zkoušky byla zkušební tělesa po odlehčení zabarvena v peci při teplotě 300 °C a dolomena v kapalném dusíku. Na lomových plochách pak byla pomocí měřicího mikroskopu změřena délka počáteční únavové trhliny a_0 a její přírůstek Δa . Hodnoty lomové houževnatosti pro všechny 3 materiály a použité stavy tepelného zpracování byly vyjádřeny parametrem $J_{0,2BL}$ [2] stanoveným z J-R křivky „offset metodou“ pro stabilní přírůstek trhliny $0,2$ mm od konstrukční křivky.

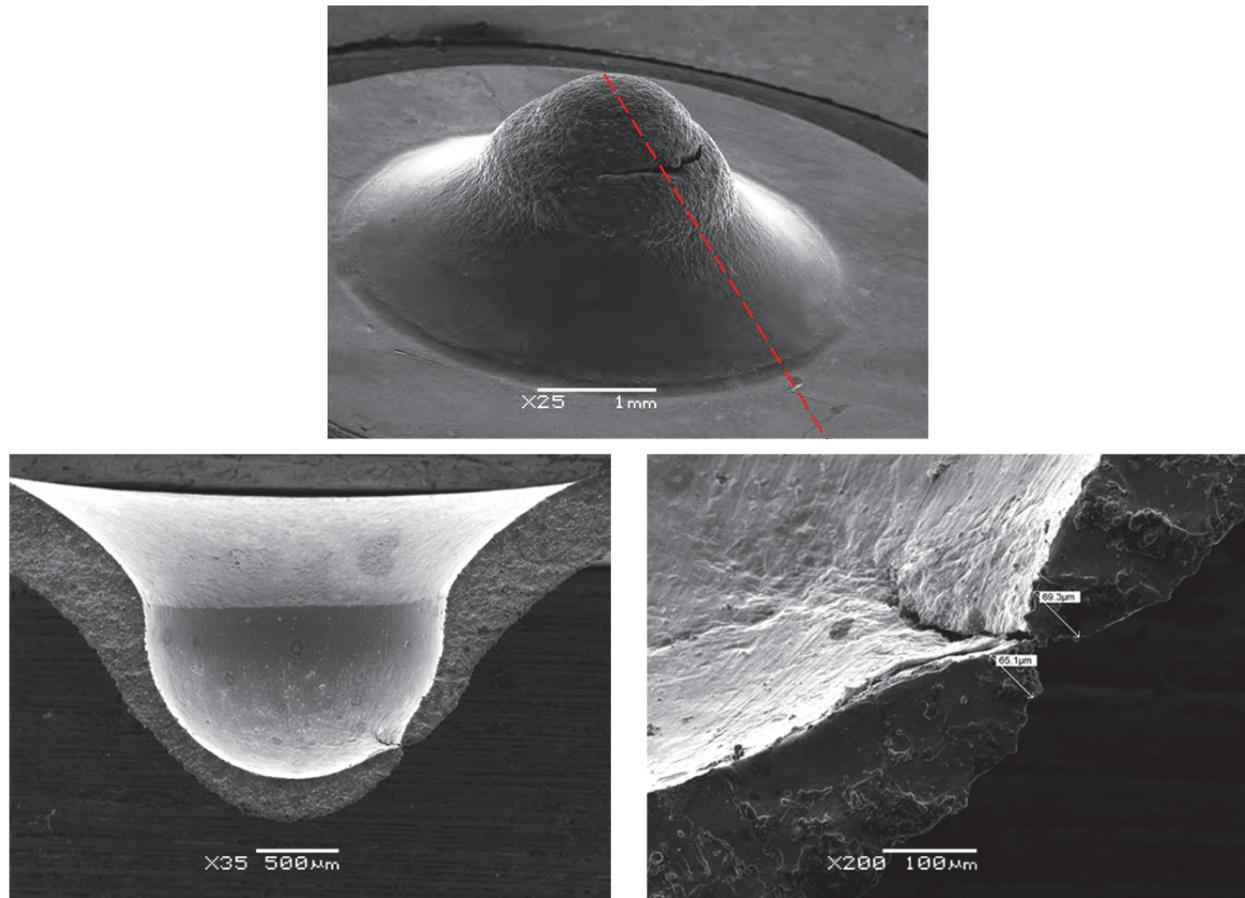
Pro posouzení vlivu normy použité pro stanovení lomové houževnatosti byly u ocelí P91 a P92 stanoveny rovněž hodnoty lomové houževnatosti dle ASTM 1820 [3].

4.2 Penetrační testy při pokojové teplotě

Penetrační testy při pokojové teplotě ($+23 \text{ °C}$) byly prováděny na servo-mechanickém zkušebním zařízení Lab Test 5.10ST o maximální síle 5 kN razníkem s hemisférickou plochou o průměru $2,0 \text{ mm}$. Pro penetrační testy byly použity disky o průměru 8 mm a tloušťce $h_o = 0,5 \pm 0,005 \text{ mm}$. Zkoušky byly prováděny při rychlosti pohybu příčnicku $1,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. V průběhu testu byla snímána závislost síla – posunutí příčnicku.

4.3 Stanovení minimální tloušťky porušeného disku h_f

Rozřezání porušených penetračních disků bylo provedeno na CNC elektroerozivní drátové děličce, model ACCUTEX AU-500iA drátem o průměru $0,25 \text{ mm}$. Porušený vzorek je vložen do speciálního přípravku, který zajišťuje kolmost řezu a umožňuje provést řez uprostřed obvodové trhliny (obr. 3, obr. 4). Měření minimálních tloušťek disků h_f bylo prováděno na elektronovém mikroskopu JEOL JSM 5510 (obr. 4) a na světelném mikroskopu KEYENCE, který byl zakoupen speciálně pro tyto účely, na obou stranách rozřezaného vzorku. Minimální hodnoty naměřené na každém rozřezaném vzorku pak byly použity pro výpočet ekvivalentní lomové deformace ϵ_f .



Obr. 4 Postup pro stanovení h_f
Fig. 4 Procedure used for determination of h_f

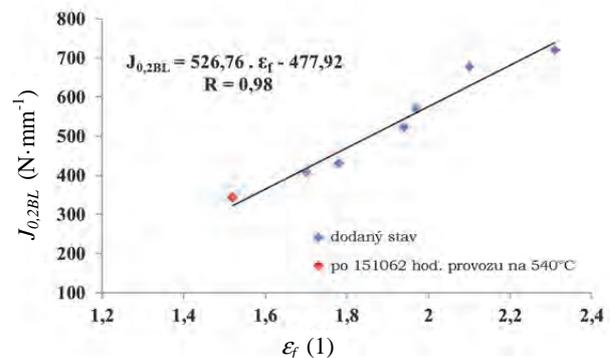
4.4 Empirické korelace pro stanovení lomové houževnatosti z výsledků penetračních testů

V tab. 4 je uvedena empirická korelace pro stanovení lomové houževnatosti z výsledků penetračních testů při pokojové teplotě pro ocel 14MoV6-3. Graficky je tato empirická korelace znázorněna na obr. 5 spolu s lomovou houževnatostí a efektivní lomovou deformací stanovenou u oceli 14MoV6-3 po dlouhodobém provozu na teplotě 540 °C.

Tab. 4 Korelační závislost $J_{0,2BL}$ vs. ϵ_f stanovená pro ocel 14MoV6-3 v neprovozaném stavu a po dlouhodobém provozu

Tab. 4 Correlation dependence $J_{0,2BL}$ vs. ϵ_f determined for 14MoV6-3 steel in as received state and after long term operation

R_{eL}	R_m	ϵ_f	$J_{0,2BL}$
(MPa)		(1)	(N·mm ⁻¹)
350	492	2,31	720
664	725	1,78	430
319	462	1,94	522
616	701	1,70	409
403	536	2,10	678
426	554	1,97	570
292	494	1,52	342



Obr. 5 Korelace pro stanovení lomové houževnatosti z výsledků penetračních testů pro ocel 14MoV6-3

Fig. 5 Correlation for determination of fracture toughness from the results of penetration tests for 14MoV6-3 steel

Z obr. 5 je zřejmé, že korelace stanovená pro ocel v neprovozaném stavu může být použita pro stanovení aktuální lomové houževnatosti po dlouhodobém provozu.

V tab. 5 jsou uvedeny empirické korelace pro stanovení lomové houževnatosti z výsledků penetračních testů při pokojové teplotě pro ocel P92 dle ISO 12135 ($J_{0,2BL}$) a ASTM 1820 (J_Q).

Tab. 5 Korelační závislosti $J_{0,2BL}$ vs. ϵ_f a J_Q vs. ϵ_f stanovené pro ocel P92 v neprovozaném stavu

Tab. 5 Correlation dependences $J_{0,2BL}$ vs. ϵ_f and J_Q vs. ϵ_f determined for P92 steel in as received state

$R_{p,0,2}$	R_m	ϵ_f	$J_{0,2BL}$	J_Q
(MPa)		(1)	(N·mm ⁻¹)	
669	805	0,91	213	234
522	697	1,20	250	408
541	709	1,02	238	286
511	686	1,00	240	300

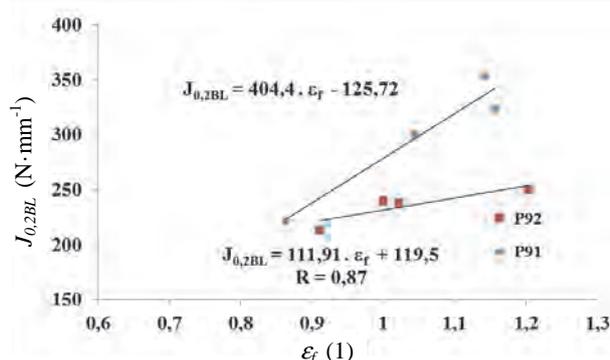
V tab. 6 jsou uvedeny empirické korelace pro stanovení lomové houževnatosti z výsledků penetračních testů při pokojové teplotě pro ocel P91 dle ISO 12135 ($J_{0,2BL}$) a ASTM 1820 (J_Q).

Tab. 6 Korelační závislosti $J_{0,2BL}$ vs. ϵ_f a J_Q vs. ϵ_f stanovené pro ocel P91 v neprovozaném stavu

Tab. 6 Correlation dependences $J_{0,2BL}$ vs. ϵ_f and J_Q vs. ϵ_f determined for P91 steel in as received state

$R_{p,0,2}$	R_m	ϵ_f	$J_{0,2BL}$	J_Q
(MPa)		(1)	(N·mm ⁻¹)	
741	859	0,86	221	257
498	669	1,14	354	484
572	718	1,16	323	443
616	753	1,04	300	371

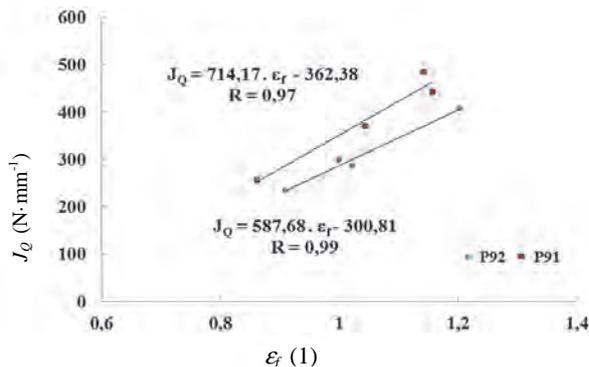
Na obr. 6 jsou graficky znázorněny empirické korelace pro stanovení lomové houževnatosti $J_{0,2BL}$ dle ISO 12135 pro oceli P91 a P92.



Obr. 6 Korelace pro stanovení lomové houževnatosti $J_{0,2BL}$ dle ISO 12135 z výsledků penetračních testů při pokojové teplotě pro oceli P91 a P92

Fig. 6 Correlations for determination of fracture toughness $J_{0,2BL}$ according to ISO 12135 from the results of penetration tests at room temperature for P91 and P92 steels

Na obr. 7 jsou graficky znázorněny empirické korelace pro stanovení lomové houževnatosti J_Q dle ASTM 1820 pro oceli P91 a P92.



Obr. 7 Korelace pro stanovení lomové houževnatosti J_Q dle ASTM 1820 z výsledků penetračních testů při pokojové teplotě pro oceli P91 a P92

Fig. 7 Correlations for determination of fracture toughness J_Q according to ASTM 1820 from the results of penetration tests at room temperature for P91 and P92 steels

Z porovnání korelací na obr. 6 a obr. 7 je zřejmé, že empirické korelace pro stanovení lomové houževnatosti dle ASTM 1820 vykazují významně vyšší koeficient korelace pro obě sledované oceli.

Závěr

Z výsledků zkoušek lomové houževnatosti a penetračních testů při pokojové teplotě u materiálu neprovozaných a provozovaných trubek z ocelí 14MoV6-3 a neprovozaných trubek z ocelí P91 a P92 lze učinit následující závěry.

- Empirické korelace ve tvaru $J_{IC} = k \cdot \epsilon_f - J_0$ je možno použít pro odhad lomové houževnatosti sledovaných ocelí z výsledků penetračních testů při pokojové teplotě.
- Empirické korelace jsou významně závislé na typu materiálu.
- Empirickou korelaci pro ocel 14MoV6-3 je možno použít pro odhad lomové houževnatosti po dlouhodobém provozu této oceli na teplotě 540 °C.
- Empirické korelace jsou významně ovlivněny normou použitou pro stanovení lomové houževnatosti z J-R křivek.
- Empirické korelace pro stanovení lomové houževnatosti dle ASTM 1820 vykazují významně vyšší koeficient korelace v porovnání s empirickými korelacemi pro stanovení lomové houževnatosti dle ISO 12135 pro obě sledované oceli.
- Přímý odhad lomové houževnatosti z výsledků penetračních testů by měl být v rámci transformace CWA 15627 na EN normu do tohoto dokumentu zahrnut.

Poděkování

Příspěvek vznikl v rámci řešení Centra kompetence TAČR TE01020068 „Centrum výzkumu a experimentálního vývoje spolehlivé energetiky“.

Literatura

- [1] MATOCHA, K., PURMENSKÝ, J. Determination of Actual Mechanical Properties of Power Plant Components by Small Specimen Testing Techniques. *KEMA Workshop „Small Punch Testing“*, Arnhem October 28, 2005.
- [2] ISO 12135 Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness. ISO 12135:2002(E).
- [3] ASTM E1820-15a Standard Test Method for Measurement of Fracture toughness. 2016 Annual Book of ASTM Standards, Section 3, Volume 03.01, p. 1097.
- [4] CEN WORKSHOP AGREEMENT „Small Punch Test Method for Metallic Materials, CWA 15627: 2007 D/E/F, December 2007.
- [5] MATOCHA, K. *Hodnocení mechanických vlastností konstrukčních ocelí pomocí penetračních testů*. Monografie, VŠB-TU Ostrava & MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., 2010, obálka a tisk GEP ARTS s.r.o., ISBN 978-80-248-2223-5.
- [6] ROBERTS, R. R., BORRADAILE, B. J., MITCHELL, R. J. Material Sampling from Components within the Nuclear Industry and the Extraction of Useful Materials Information. In *1st International Conference SSTT Determination of Mechanical Properties of Materials by Small Punch and other Miniature Testing Techniques*, August 31 to September 2, 2010, pp.19–24, ISSN 0018-8069, ISBN 978-80-254-7994-0.
- [7] BAYOUMI, M. R., BASSIM, M. N. Study of the Relationship Between Fracture Toughness (J_{IC}) and Bulge Ductility. *International Journal of Fracture*, 23 (1983), 71–79.
- [8] KONOPÍK, P., DŽUGAN, J., PROCHÁZKA, R. Determination of Fracture Toughness and Tensile Properties of Structural Steels by Small Punch Test and Micro-tensile Test. In *METAL 2013*, 15-17 May 2013, Brno, CD-ROM.
- [9] SHAH, P. K., CHATTERJEE, S.: Measurement of Tensile and Fracture Toughness Properties Using Small Punch Test. Pressure Vessels and Piping. In. *International Conference & Exhibition on Pressure Vessels and Piping “OPE 2006 – CENNAI”*, 7-9, February 2006, Chennai, India, CD-ROM.
- [10] GUAN, K., HUA, L., WANG, Q., ZOU, X., SONG, M. Assessment of Toughness in Long Term Service CrMo Low Alloy Steel by Fracture Toughness and Small Punch Test. *Nuclear Engineering and Design*, 241 (2011), 1407–1413.
- [11] DŽUGAN, J., KONOPÍK, P. Evaluation of Fracture Toughness Properties for Low Carbon Steel in the Brittle State by Small Punch Test Technique. In. *1st Int. Conf. SSTT (Small Sample Test Techniques)*, Vol. 63, pp. 119–122; 2010, Metallurgical Journal.
- [12] KONOPÍK, P., DŽUGAN, J. Small Punch Test Application to Fracture Toughness Determination in the Upper Shelf Region. In. *1st Int. Conf. SSTT (Small Sample Test Techniques)*, Vol. 63, pp. 123–127, 2010, *Metallurgical Journal*, ISSN 0018-8069.
- [13] MISAWA, T., NAGATA, S., AOKI, N., ISHIZAKA, J., HAMAGUCHI, Y. Fracture Toughness Evaluation of Fusion Reactor Structural Steels at Low Temperatures by Small Punch Tests. *Journal of Nuclear Materials*, 169 (1989), 225–232.
- [14] MAO, X., SAITO, M., TAKAHASHI, H. Small Punch Test to Predict Ductile Fracture Toughness J_{IC} and Brittle Fracture Toughness K_{IC} . *Scripta METALLURGICA*, 25 (1991), 2481–2485.
- [15] *Small Punch Testing for Fracture Toughness Measurement, R-105130*. Research Project 2426-38, Prepared for EPRI, June 1995.

Je vyráběno stále méně surové oceli v elektrických pecích

recycling.de

31.05.2016

Výrobou surové oceli v elektrických pecích, založené na železném šrotu, je produkováno stále méně surové oceli. Zatímco v roce 2006 bylo ještě vyráběno až 32 % celosvětové produkce surové oceli tímto způsobem, o deset let později v roce 2015 bylo již jen 25,1 %. Podíl elektrooceli klesá v celkové produkci již tři roky po sobě. Jak ukazují nejnovější statistiky worldsteel, například největší producent oceli na světě Čína sází v současné době prakticky stoprocentně jen na kyslíkový proces. Podstatný pokles podílu elektrooceli v posledních deseti letech vyplývá především z minimálního podílu tohoto výrobního způsobu v Číně (v roce 2015 jen 6,1 %), v Německu činí podíl elektrooceli v posledních deseti letech konstantních 30-32 % s trvale klesající tendencí.

Výsledky setkání G7 v Japonsku: Musí přijít rychlá řešení k odbourání přebytečných kapacit na výrobu oceli

Stahl Aktuell

08.06.2016

Přestavitelé zemí G7 byli na posledním setkání v Japonsku zneklidněni globálními přebytečnými kapacitami v některých odvětvích, zejména v ocelářském průmyslu. V následném komuniké se rozhodli tento problém řešit co nejrychleji, aby se našly možnosti k odbourání přebytečných kapacit. Znepokojeni jsou zejména vládními subvencemi, které pokrývají a deformují trh. V názoru na věc si byli účastníci setkání jednotní. „Aniž by se jmenovitě uvedla Čína, která se jednání neúčastnila, obrací se komuniké proti největším světovým výrobcům oceli,“ komentuje výsledky jednání Commerzbank. G7 chce využít mimo jiné organizace jako je OECD, aby se vedla jednání o likvidaci přebytečné nabídky.