

## Přístupy k hodnocení lomové houževnatosti konstrukčních ocelí v prostředí vysokotlakého vodíku

### Approaches to the assessment of the fracture toughness of structural steels in a high-pressure hydrogen gas environment

Ing. Marek Dobiáš; Ing. Petr Čížek, Ph.D.; doc. Ing. Petr Jonšta, Ph.D.

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

*Aktuálním trendem je hledání alternativních zdrojů energie k současným fosilním zdrojům a jako jedna z možností se nabízí vodík. Pro celou infrastrukturu potřebná pro jeho výrobu, skladování a transport je vyžadováno používání ocelí, které jsou odolné degradaci způsobené vodíkem, vodíkovému praskání. Materiály, které jsou používány v prostředí plynného vodíku při vysokém tlaku, je možné z hlediska lomové mechaniky hodnotit několika metodami, které mají různé postupy pro určení prahového faktoru intenzity napětí v tahu náchylnosti k praskání kovových materiálů v prostředí plynného vodíku  $K_{IH}$ . Často jsou zmíněnými metodami získávány i rozdílné výsledky a cílem této práce je seznámit se s danou problematikou a obeznámit se s důvody tohoto stavu. K tomu byly využity zkoušky konstantního rozevření vzorku a přímého a postupného zatěžování vzorku. Výsledkem experimentů naší práce je tvrzení, že nejkonzervativnější výsledky podává metoda konstantního rozevření vzorku i přesto, že při ní nedocházelo k růstu trhliny, popř. trhlina porostla ve velmi malém rozsahu.*

**Klíčová slova:** vodíkové praskání; lomová houževnatost; 34CrMo4; vysokotlaký plynný vodík

*The present trend is the search for alternative sources of energy to current fossil sources, and hydrogen is offered as one of the options. The entire infrastructure required for its production, storage and transport requires the use of steels that are resistant to degradation caused by hydrogen, hydrogen induced cracking (HIC). Materials used in a hydrogen gas environment at high pressure can be evaluated from the point of view of fracture mechanics by several methods, which have different procedures for determining the threshold stress intensity factor for environmentally-assisted cracking  $K_{IH}$ . Unfortunately, the mentioned methods often may have different results, and the goal of this work is to get to know the issue and the reasons for this state of affairs. For this, constant displacement tests, stepwise rising load tests and monotonic rising load tests were used. As a result of the experiments of our work, the statement is that the constant displacement test gives the most conservative results, despite the fact that there was no crack growth, or the crack propagated to a very small extent.*

**Key words:** hydrogen cracking; fracture toughness; 34CrMo4; high pressure hydrogen gas

## 1. Úvod

Hodnocení materiálů z hlediska lomové mechaniky přináší velký posun ve výrobě vodíkových lahví a jejich komponentů. Zkoušky musí simulovat co nejpřesněji prostředí a mechanické podmínky. V současnosti neexistuje přesvědčující důkaz, že u feritických ocelí lze plynné prostředí pod tlakem nahradit tepelným vodíkováním v plynném vodíku nebo jinou elektrochemickou metodou. Nejvěrnější možností zkoušení je tedy testování ve vysokotlakém plynném vodíku [1]. V dřívějších pracích, např. [1-3], bylo pozorováno, že použitím jednotlivých metod (metoda konstantního rozevření vzorku, metoda postupného zatěžování a metoda přímého zatěžování) bylo dosahováno odlišných výsledků, proto je třeba zkoumat důvody, proč

tomu tak je. Na druhou stranu některé práce [4, 5] uvádějí pro obě metody podobné výsledky.

## 2. Experimentální materiál a zkušební metody

Do laboratoří MATERIÁLOVÉHO A METALURGICKÉHO VÝZKUMU, s.r.o. byly dodány tlakové lahve vyrobené z chrommolybdenové oceli 34CrMo4, ze kterých byly zhotoveny zkušební vzorky. Chemická analýza byla provedena a výsledky jsou uvedeny spolu s normovanými hodnotami v tab. 1, kde vzájemným srovnáním lze konstatovat, že změřené hodnoty odpovídají hodnotám v normě.

Tab. 1 Výsledky chemické analýzy  
Tab. 1 Results of chemical analysis

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Cu
34CrMo4 pro ČSN EN ISO 11114-4 [6]	0,34	0,69	0,25	0,014	0,001	1,07	0,20	0,16
34CrMo4 pro ASTM E1820 [7]	0,35	0,78	0,302	0,003	< 0,001	1,13	0,203	0,114
ČSN EN ISO 683-2 [8]	0,30 0,37	0,60 0,90	0,10- 0,40	≤ 0,025	≤ 0,035	0,90- 1,20	0,15 0,30	≤ 0,40

Dále byly změřeny mechanické vlastnosti pomocí zkoušky tahem na vzorcích kruhového průřezu o průměru  $d = 6$  mm na vzduchu. Zkoušky byly provedeny v režimu konstant-

ního posunu při rychlosti pístnice  $v_c = 0,5$  mm.min<sup>-1</sup> a výsledky jsou v tab. 2. Jak je z ní patrné, získané hodnoty nedosahují těch uvedených v normě.

Tab. 2 Výsledky zkoušky tahem na vzduchu při pokojové teplotě  
Tab. 2 Results of tensile tests on air at ambient temperature

	Smluvní mez kluzu v tahu $R_{p0,2}$	Smluvní mez pevnosti v tahu $R_m$
	[MPa]	
34CrMo4 – láhev L1 pro ČSN EN ISO 11114-4 [6]	1050	972
34CrMo4 – láhev L2 pro ČSN EN ISO 11114-4 [6]	1062	989
34CrMo4 pro ASTM E1820 [7]	661	830
ČSN EN ISO 683-2 [8]	min. 800	1000 – 1200

Pro hodnocení materiálů užívaných v prostředí plynného vodíku při vysokém tlaku je používáno mj. norem ČSN EN ISO 11114-4 [6] a ANSI/CSA CHMC1 [9]. První z uvedených norem obsahuje tři různé metody: zkouška kotouče (metoda A), zkouška lomové mechaniky (metoda B) a zkušební metoda pro stanovení odolnosti ocelových lahví proti vodíkovému praskání (metoda C). Výstup dvou posledních uvedených je stejný, jedná se o prahový faktor intenzity napětí v tahu náchylnosti k praskání kovových materiálů v prostředí plynného vodíku  $K_{IH}$  [MPa.m<sup>0,5</sup>], u první metody je získávána pouze závislost poměru opravených tlaků při porušení kotouče vodíkem a při porušení heliem  $P_r'_{He}/P_r'_{H2}$  na rychlosti růstu tlaku  $X$ . Tento článek je zaměřen na metodu B a C. U druhé uvedené je jedna ze zkoušek založena na normě ASTM E1820 [7], podle které byly provedeny i zkoušky uvedené zde. Získané výsledky jsou pak používány pro výpočet životnosti výrobků vyrobených z těchto materiálů.

## 2.1 ČSN EN ISO 11114-4 Metoda B

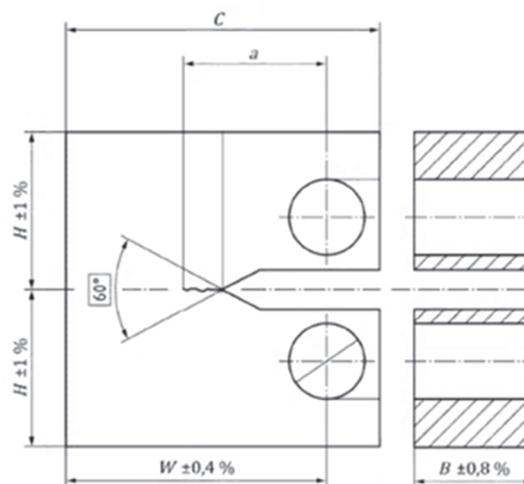
Principem zkoušky je krokové zatěžování rostoucí tahovou silou kompaktního vzorku C(T) ve tvaru dle normy ČSN EN ISO 7539-6 [10], viz obr. 1 a to prostředí plynného vodíku za zvoleného tlaku. Jsou zkoušeny alespoň tři vzorky odebrané ze stěny lahve po 120°. Na vzorcích se připraví únavová trhlinka. Následně se vzorek vloží do dynamického autoklávu, ten se propláchne dusíkem, odvakuuje a natlakuje vodíkem na potřebný tlak  $p$ . Vzorek je pak zatížen na zvolenou hodnotu faktoru intenzity napětí v tahu  $K_I$  po dobu 20 minut, pokud během této doby nedojde k růstu trhliny, popř. k nestabilnímu šíření trhliny, zatížení se každých 20 minut zvyšuje o hodnotu faktoru intenzity napětí v tahu  $K_I = 1$  MPa.m<sup>0,5</sup>, dokud nedojde k uvedenému jevu. Výsledkem zkoušky je výpočet prahového faktoru intenzity napětí v tahu náchylnosti

k praskání kovových materiálů v prostředí plynného vodíku  $K_{IH}$  podle rovnice (1) [6].

$$K_{IH} = \frac{Y P}{B W^{0,5}} \quad (1)$$

kde  $Y[-]$  je tvarový faktor pro C(T) vzorek uvedený v ČSN EN ISO 7539-6 [10] a  $P$  [N] je silové zatížení vzorku před konečným přírůstkem, které způsobilo selhání. Platí-li nerovnost (2) [6] pro všechny tři vzorky, pak lze konstatovat, že materiál je použitelný v daném prostředí, a to pro průměr dvou hodnot meze pevnosti v tahu  $R_m$  získaných zkouškami tahem na stejném materiálu [6].

$$K_{IH} \geq \frac{60}{950} R_m \quad (2)$$



Obr. 1 Schéma C(T) vzorku, kde  $W$  [mm] je šířka,  $C$  [mm] je celková šířka,  $a$  [mm] je délka trhliny,  $H$  [mm] je polovina výšky a  $B$  [mm] je tloušťka [10]

Fig. 1 Mechanical draw of C(T) specimen, where  $W$  [mm] is net width,  $C$  [mm] is total width,  $a$  [mm] is effective crack length,  $H$  [mm] is half-height and  $B$  [mm] is thickness [10]

## 2.2 ČSN EN ISO 11114-4 Metoda C

Podle této metody jsou tři C(T) vzorky s počáteční trhlinou, připravenou při zátěži faktoru intenzity elastického napětí v tahu  $K_{IAPP}$  vypočteného jako 1,5 násobek výrazu v rovnici (2), stejného typu jako u metody B, viz obr. 1, avšak upravených pro konstantní rozevření podle obr. 2, roztaženy na konstantní hodnotu rozevření otvoru trhliny  $V$  [mm] (angl. *CMOD* – crack mouth opening displacement) vypočtenou podle rovnice (3) [6]

$$V = \frac{K_{IAPP}}{EY_2} \left( \frac{WB_N}{B} \right)^{0,5} \quad (3)$$

kde  $E$  [MPa] je Youngův modul pružnosti,  $Y_2$  [-] je tvarový faktor uvedený v ČSN EN ISO 11114-4 [6], kde je označený jako  $f(x)$ , a  $B_N$  [mm] je tloušťka vzorku v rovině vrubu. Vzorky jsou poté vloženy do statického autoklávu a proběhne stejný postup tlakování jako u metody B, následně probíhá zkouška po minimální dobu  $t$  1000 hodin. Po ukončení zkoušky je změřen přírůstek trhliny  $\Delta a$  a materiál vyhovuje pro průměr tří hodnot meze pevnosti v tahu  $R_m$  určených zkouškou tahem, platí-li  $\Delta a < 0,25$  mm, pak i  $K_{IAPP} = K_{IH}$ , nebo  $\Delta a > 0,25$  mm, ale zároveň pro vypočtené  $K_{IH}$  z počáteční délky trhliny  $a_0$  a změřené přes celou tloušťku vzorku platí výraz (2), pak materiál vyhovuje také [6].

## 2.3 ASTM E1820

Dle této známé metody je v našem případě pět C(T) vzorků stejného typu jako v obr. 1 s počáteční předcyklovanou trhlinou tahově zatěžováno pro získání stabilního přírůstku trhliny  $\Delta a$  tak, aby bylo možné zkonstruovat R-křivku, ze které se následně určí prahový faktor intenzity napětí v tahu náchylnosti k praskání kovových materiálů v prostředí plynného vodíku  $K_{IH}$  podle rovnice (4) [7].

$$K_{IH} = \left( \frac{EJ_{IH}}{1-\nu^2} \right)^{0,5} \quad (4)$$

Tab. 3 Výsledky metody B normy ČSN EN ISO 11114-4 [6, 11]

Tab. 3 Results of method B of ČSN EN ISO 11114-4 standard [6, 11]

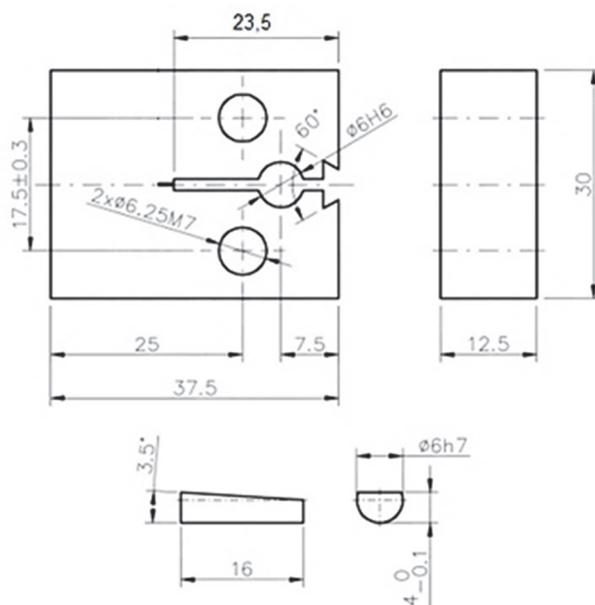
2	Počáteční délka trhliny $a_0$	Přírůstek trhliny $\Delta a$	prahový faktor intenzity napětí v tahu náchylnosti k praskání kovových materiálů v prostředí plynného vodíku $K_{IH}$	Typ porušení
	[mm]		[MPa·m <sup>0,5</sup> ]	
1-A	12,66	1,68	94,3	stabilní růst trhliny
1-B	12,84	1,56	52,1	stabilní růst trhliny (odlehčeno)
1-C	12,64	-	40,5	náhlý nestabilní lom

Podle metody C byly provedeny zkoušky při hodnotě faktoru intenzity elastického napětí v tahu  $K_{IAPP}$  asi 95 MPa·m<sup>0,5</sup> a zkušena při tlaku  $p$  30 MPa po dobu  $t$  1076 hodin, viz tab. 4. U všech vzorků byly pozorovány přírůstky trhliny  $\Delta a$  menší než 0,25 mm, a tedy hodnoty

kde  $J_{IH}$  [N·mm<sup>-1</sup>] je lomový odpor pro hodnotu stabilního přírůstku trhliny  $\Delta a = 0,2$  mm v prostředí plynného vodíku a  $\nu$  [-] je Poissonův poměr [7].

## 3. Výsledky a jejich diskuse

Zkouška metodou B byla provedena při tlaku plynného vodíku 15 MPa na 3 C(T) vzorcích odebraných z tlakové lahve. První hodnota zatížení byla nastavena při faktoru intenzity napětí v tahu  $K_I$  v rozsahu 20 – 30 MPa·m<sup>0,5</sup>. Pro měření přírůstku trhliny  $\Delta a$  byla použita potenciálová metoda. Výsledky byly již publikovány Čížekem, P. a Kanderem, L.[11], zde jsou uvedeny v tab. 3 pro účely srovnání. Podmínku (2) splňuje pouze vzorek 1-A.



Obr. 2 Schéma C(T) vzorku upraveného pro konstantní rozevření pomocí klínů zakreslených níže v obrázku

Fig. 2 Mechanical draw of C(T) specimen modified for constant displacement test with help of wedges outlined below

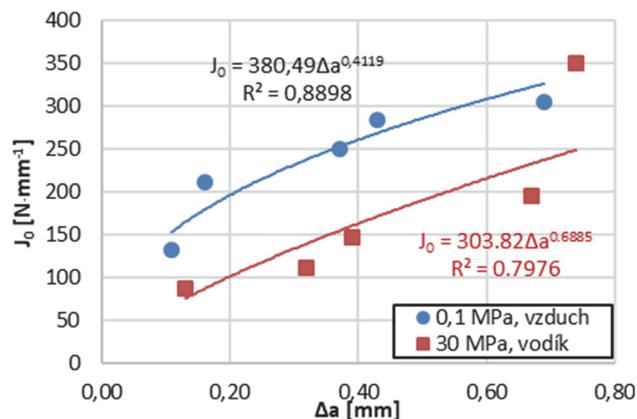
faktoru intenzity elastického napětí v tahu  $K_{IAPP}$  jsou rovny prahovému faktoru intenzity napětí v tahu náchylnosti k praskání kovových materiálů v prostředí plynného vodíku  $K_{IH}$ .

Tab. 4 Výsledky metody C normy ČSN EN ISO 11114-4 [6] pro faktor intenzity elastického napětí v tahu KIAPP asi 95 MPa·m<sup>0.5</sup> při tlaku p 30 MPa po dobu t 1076 hodin

Tab. 4 Results of method C of ČSN EN ISO 11114-4 standard [6] for applied elastic stress intensity factor KIAPP of value 95 MPa·m<sup>0.5</sup> at 30 MPa of pressure p for 1076 hours of time t

Označení	Počáteční délka trhliny $a_0$	Přírůstek trhliny $\Delta a$	Zatížení $P$	faktor intenzity elastického napětí v tahu $K_{IAPP}$
	[mm]		[N]	[MPa·m <sup>0.5</sup> ]
L1-4	13,43	0,02	10 298	95,7
L1-5	12,99	0,03	10 823	96,3
L1-6	13,05	0,03	10 773	95,5
L2-4	13,16	0,02	10 770	96,9
L2-5	13,14	0,02	10 799	96,6
L2-6	13,17	0	10 815	97,4

Zkouška podle ASTM E1820 [7] byla prováděna ve vodíkovém autoklávu při 30 MPa rychlosti pístitnice  $v_c = 0,012 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  a to bez extenzometru. Místo něj se určilo plastické rozevření otvoru trhliny  $V_p$ , které je rovno rozdílu hodnot rozevření otvoru trhliny  $V$  změřených pod mikroskopem před a po zkoušce. To se použilo ve výpočtu pro rozevření čela trhliny  $\delta_0$  (angl. CTOD – crack tip opening displacement), které bylo následně přepočteno aproximací na lomový odpor  $J_0$ . Pro srovnání byla zhotovena R-křivka i na vzduchu. Výsledky, které byly již prezentovány dříve (Dobiáš M. et al. [3]), jsou uvedeny pro porovnání na obr. 3. Prahový faktor intenzity napětí v tahu náchylnosti k praskání kovových materiálů v prostředí plynného vodíku  $K_{IH}$  se rovná 147,7 MPa·m<sup>0.5</sup>. Obdobně lomová houževnatost pro lomový odpor  $J_{0,2}$  při přírůstku trhliny  $\Delta a$  0,2 mm  $K_{JC0,2}$  na vzduchu je rovna hodnotě 206,5 MPa·m<sup>0.5</sup> [3].



Obr. 3 R-křivky oceli 34CrMo4 pro vzduch a pro vodík při 30 MPa  
Fig. 3 R-curves of 34CrMo4 steel in air and in 30 MPa hydrogen gas

Seřazením hodnot prahových faktorů intenzity napětí v tahu náchylnosti k praskání kovových materiálů v prostředí plynného vodíku  $K_{IH}$  jednotlivých metod podle velikosti, kdy metoda C normy ČSN EN ISO 11114-4 [6] < ASTM E1820 [7] pro 30 MPa, je vidět, že nejkonzervativnější výsledky podává metoda C normy ČSN EN ISO 11114-4 [6].

Na základě výsledků jiných studií, např. NIBUR K. A. et al. [1], který prováděl zkoušky při 103 MPa podle článku KD-10 normy ASME BPVC VIII-3 [12] ekvivalentní metodě C normy ČSN EN ISO 11114-4 [6] a podle ASTM E1820 [7], by nižší výsledky vzhledem k ostatním metodám měla podávat i metoda ASTM E1820 [7]. Zkoušena byla mj. ocel SA372 třídy J se smluvní mezí kluzu v tahu  $R_{p0,2}$  783 MPa a se smluvní mezí pevnosti  $R_m$  907 MPa. Výsledkem byly prahové faktory intenzity napětí v tahu při otevření trhliny  $K_{THi}$  o hodnotě 47 MPa·m<sup>0.5</sup> a při uzavření trhliny  $K_{THa}$  o hodnotě 81 MPa·m<sup>0.5</sup>.

Také rozdíl mezi metodou B a C je dokumentovaný, např. prací GANGLOFFA R. P. [2], kde porovnával právě zkoušky při zvyšujícím se napětí a zkoušky při konstantním rozevření, byť testovaných podle jiných norem a navíc vzorky byly vodíkovány a následně zkoušeny na vzduchu. Předpokládá se, že okamžitá koncentrace vodíku ve vzorcích testovaných při konstantním rozevření byla menší než ve vzorcích testovaných při zvyšujícím se napětí vlivem mnohem delší doby testování a tendence vodíku unikat z feritických ocelí. Nicméně rozdíly vymizely při smluvní mezi pevnosti v tahu  $R_m$  okolo 1000 MPa [2]. U zkoušek konstantního rozevření vzorku testovaných přímo ve vysokotlakém vodíku má navíc vliv i inkubační doba, po kterou je vzorek vystaven vysokotlakému plynnému vodíku, ale vodíkové praskání ještě nenastává, a plynné prostředí, ve kterém dochází k zatěžování vzorků pro metodu C normy ČSN EN ISO 11114-4 [6], může inkubační dobu mírně ovlivňovat. Existuje také oblast hodnot faktoru intenzity elastického napětí v tahu  $K_{IAPP}$ , při kterých přírůstek trhliny nenastává. Důvodem rozdílů může být způsob pronikání vodíku do oceli ovlivněný čistotou plynu, čistotou povrchu vzorku, rychlostí pístitnice  $v_c$  při zkoušení a historií zatěžování vzorku. Také oxidické povlaky mohou zastavit disociaci a adsorpci vodíku na povrchu vzorku. Zajímavá je i zmínka o závislosti konečné délky trhliny  $a_f$  na prahovém faktoru intenzity napětí v tahu při uzavření trhliny  $K_{THa}$  a na rozevření otvoru trhliny  $V$ . Při konstantní hodnotě prahového faktoru intenzity napětí v tahu při uzavření trhliny  $K_{THa}$  musí být rozevření otvoru trhliny  $V$  menší pro získání menší konečné délky trhliny  $a_f$ . Je-li však rozevření otvoru trhliny  $V$  menší, je potřeba mít také

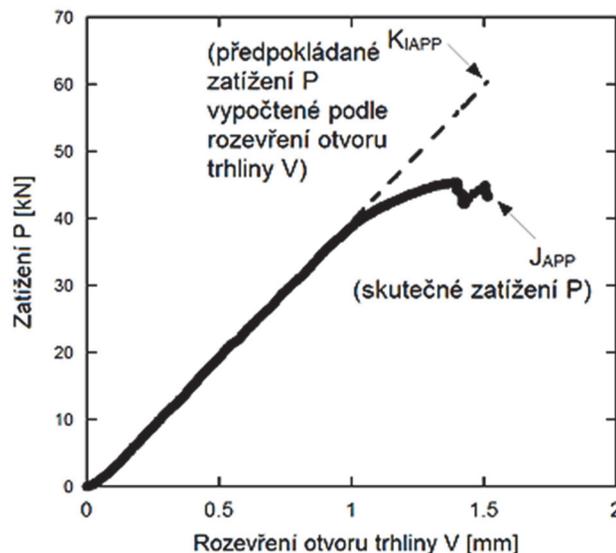
menší počáteční délku trhliny  $a_0$ , aby se zajistila dostatečně vysoká hodnota faktoru intenzity elastického napětí v tahu  $K_{IAPP}$  [1].

K zatěžování podle metody C normy ČSN EN ISO 11114-4 [6] je používán faktor intenzity elastického napětí v tahu  $K_{IAPP}$ , který předpokládá lineárně elastické chování vzorku při zatěžování a který by měl zajistit minimální hnací sílu trhliny potřebnou pro růst trhliny. Vzorky některých materiálů však mohou mít větší plastický podíl lomového odporu  $J$  a zároveň faktor intenzity elastického napětí v tahu  $K_{IAPP}$  značně nadhodnocuje skutečné zatížení vzorku, viz obr. 4. Nicméně hodnota faktoru intenzity elastického napětí v tahu  $K_{IAPP}$  dobře reprezentuje skutečný stav čela trhliny, i když výrazná plasticita na čele trhliny naznačuje, že metoda jeho stanovení není úplně v pořádku. Předpokládalo se, že u nízkopevnostních ocelí dochází k otupení čela trhliny vlivem vysokých hodnot faktoru intenzity elastického napětí v tahu  $K_{IAPP}$ , což může snížit hnací sílu trhliny a tím zamezit růstu trhliny. Nicméně v práci NIBURA K. A. et al. [1] elastoplastická analýza ukazuje na zvýšení hnací síly trhliny právě vlivem velké plastické deformace čela trhliny. Pro posouzení platnosti lineárně elastické lomové mechaniky při uzavření trhliny by však elastoplastická analýza nebyla snadno proveditelná, protože odlehčování konstantně rozevřeného vzorku během růstu trhliny ruší předpoklad proporcionálního zatížení, který je základem pro platnost lomového odporu  $J$ . Byla proto provedena analýza platnosti faktoru intenzity napětí  $K$  při uzavření trhliny metodou konečných prvků, podle které lze tvrdit, že faktor intenzity napětí  $K$  popisuje pole čela trhliny přesně [1].

I práce MATSUMOTY T. et al. [4] porovnává zkoušky konstantního rozevření vzorku podle článku KD-10 normy ASME BPVC VIII-3 [12], který obsahuje mj. zkoušku ekvivalentní metodě C normy ČSN EN ISO 11114-4 [6], zkoušky postupného zatěžování vzorku podle metody B normy ČSN EN ISO 11114-4 [6] a zkoušky přímého zatěžování vzorku v souladu s normou ASTM E399 [13]. Testy byly provedeny při 35 a 115 MPa tlaku plynného vodíku na oceli ekvivalentní 34CrMo4 oceli, JIS-SCM435, která měla smluvní mez kluzu v tahu  $R_{p0,2}$  772 MPa a smluvní mez pevnosti v tahu  $R_m$  948 MPa. Výsledkem byl prahový faktor intenzity napětí v tahu při uzavření trhliny  $K_{THa}$  ze zkoušky konstantního rozevření vzorku o hodnotách 44,3 – 44,5 MPa·m<sup>0,5</sup> pro 115 MPa tlaku plynu a 53,2 MPa·m<sup>0,5</sup> pro 35 MPa tlaku plynu a prahový faktor intenzity napětí v tahu při otevření trhliny  $K_{THi}$  ze zkoušek přímého a postupného zatěžování vzorku o hodnotách 33,1 – 41,1 MPa·m<sup>0,5</sup> pro 115 MPa a ze zkoušky přímého zatěžování vzorku 52,4 MPa·m<sup>0,5</sup> pro 35 MPa. Závěrem jeho práce tedy je, že všechny tři metody jsou vhodné pro určování prahového faktoru intenzity napětí v tahu náchylnosti k praskání kovových materiálů v prostředí plynného vodíku  $K_{IH}$ . Porovnáním jeho výsledků při 35 MPa s našimi výsledky při 30 MPa je vidět, že jeho výsledky jsou mnohem konzervativnější.

Na druhou stranu součástí uvedených prací bylo pro zkoušky konstantního rozevření vzorku určení prahových

faktorů intenzity napětí v tahu při uzavření trhliny  $K_{THa}$ , které v naší práci provedeno nebylo.



Obr. 4 Porovnání předpokládaného a skutečného zatížení  $P$ , kde  $J_{APP}$  je vypočtený lomový odpor  $J$  vzorku ze skutečného zatížení  $P$ , tj. z hlediska elastoplastického chování [1]

Fig. 4 Comparison of assumed load  $P$  based on displacement  $V$  and actual applied load  $P$ , from which  $J_{APP}$  is calculated  $J$ -integral of specimen, i.e. from point of view of elastoplastic behaviour [1]

#### 4. Závěry

Byly provedeny zkoušky podle metody B a C normy ČSN EN ISO 11114-4 [6] a podle normy ASTM E1820 [7]. Porovnáním výsledků bylo zjištěno, že nejkonzervativnější výsledky má metoda C, i když v jejím případě byly přírůstky trhliny  $\Delta a$  velmi malé či žádné. Porovnáním výsledků s jinými pracemi se došlo k závěru, že naše výsledky jsou benevolentnější. Některé z prací navíc tvrdí, že výsledky obou typů zkoušek (konstantní rozevření vzorku a přímé či postupné zatěžování vzorku) vycházejí podobně. Každopádně některé potenciální důvody různých výsledků byly v článku nastíněny a budou předmětem dalšího zkoumání.

#### Poděkování

„Tento příspěvek vznikl v rámci Institucionální podpory dlouhodobého a koncepčního rozvoje výzkumné organizace v roce 2023, kterou poskytlo Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky.“

#### Literatura

- [1] NIBUR K. A. et al. *Measurement and interpretation of threshold stress intensity factors for steels in high-pressure hydrogen gas*, United States: N. p., 2010.
- [2] GANGLOFF, R. P. *Hydrogen assisted cracking of high strength alloys*, sv. 6, New York, NY: Elsevier Science, 2003, pp. 31-101.
- [3] DOBIÁŠ, M. et al. *Hydrogen impact on fracture properties of 34 CrMo4 pressure cylinder steel*, Ostrava: Tanger, 2023.

- [4] MATSUMOTO, T. et al. *Threshold stress intensity factor for hydrogen-assisted cracking of Cr-Mo steel used as stationary storage buffer of a hydrogen refueling station*, sv. 42, 2017.
- [5] WADA, Y. et al. *Evaluation of metal materials for hydrogen fuel station*, Italy, 2005.
- [6] ČSN EN ISO 11114- 4, Praha: ÚNMZ, 2019.
- [7] ASTM E 1820 : 2022 : EDT 1, USA: ASTM, 2022-09.
- [8] ČSN EN ISO 683-2, Praha: ÚNMZ, 2020.
- [9] ANSI/CSA CHMC 1, Canada: CSA Group, 2018.
- [10] ČSN EN ISO 7539-6, Praha: ÚNMZ, 2019.
- [11] ČÍŽEK, P. and KANDER, L. *Fracture behavior of 34CrMo4 steel in high-pressure hydrogen environment*, Ostrava: Tanger, 2020, pp. 597-602.
- [12] ASME BPVC VIII-3-2021, New York: ASME, 2021.
- [13] ASTM E399, USA: American Society for Testing and Materials, 2022.

## Skokový růst regulovaných složek ceny energií může fatálně ohrozit konkurenceschopnost firem

Praha, 6. listopadu 2023 – Ocelářská unie odmítá navrhované navýšení regulovaných složek cen energií, protože přímo povede k razantnímu zvýšení nákladů ocelářských, ale i dalších průmyslových firem v ČR o desítky až stovky milionů korun za rok. Vláda vedle toho bohužel plánuje i jiné kroky, které mohou zvýšit náklady firem o další stovky milionů korun. To vše povede k oslabení jejich konkurenceschopnosti ve chvíli, kdy čelí poklesu poptávky kvůli obecně nepříznivé makroekonomické situaci doma i na klíčových trzích v EU.

Rozhodnutí vlády alokovat na podporu OZE (POZE) v roce 2024 jen 9,35 mld. Kč společně s návrhem cenového rozhodnutí ERÚ pro elektroenergetiku ze dne 30. 10. 2023 znamená pro české oceláře hrozbu skokového nárůstu nákladů na energie. Částka hrazená firmami za regulované složky se v roce 2024 ve srovnání s rokem 2022 zvýší o 200 až 250 %. V porovnání s rokem 2023 je nárůst ještě markantnější. Pro modelovou firmu s roční spotřebou 70 GW elektřiny by to proti roku 2022 znamenalo navýšení nákladů o 51 mil. Kč (227 %). Pro velkou hutní firmu by roční náklady vzrostly o více než půl miliardy korun. Argument vlády v tom smyslu, že vyšší náklady na regulované složky ceny elektřiny bude kompenzovat nižší cena komodity, tj. silové elektřiny, přitom neplatí, protože velké průmyslové firmy většinou jistí dodávku silové elektřiny dopředným nákupem forwardových produktů v tzv. tranších. Silová složka ceny elektřiny v tomto případě nijak rychle ani významně neklesne.

V letech 2016 až 2023 stát na POZE ze státního rozpočtu alokoval v průměru skoro 25 miliard korun ročně. „*Nejedná se o žádnou dotaci velkým průmyslovým firmám, ale především o nesmyslně vysokou podporu fotovoltaickým elektrárnám nastavenou skoro před 20 lety,*“ říká Daniel Urban, předseda představenstva Ocelářské unie. Regulované složky ceny elektřiny jsou a budou velmi vysoké hlavně kvůli růstu obnovitelných zdrojů, nákladům na posilování infrastruktury, a také drahé silové elektřině, kterou provozovatelé soustav musí nakupovat na krytí ztrát a balancing.

Česko má podle čerstvých dat Eurostatu čtvrtou nejdražší elektřinu pro velké zákazníky v EU. „*Chytřejší členské státy EU ví, že v této situaci je podpora průmyslu klíčová, protože jinak nepřežije náročnou a nákladnou zelenou transformaci. Nikde přitom není role průmyslu tak makroekonomicky důležitá, jako v Česku,*“ doplňuje Urban.

Například v Německu se historicky prostředky na podporu OZE vybíraly od zákazníků, ale od 1. 7. 2022 německé firmy ani domácnosti neplatí nic a POZE se nově financuje skrze Klimatický a transformační fond. V době zrušení byl poplatek 37,2 eur/MWh, tedy přibližně 1000 Kč/MWh. Ve Francii mají zase velcí spotřebitelé nárok na pokrytí významné části spotřeby elektřiny za cenu 45 eur/MWh v rámci schématu ARENH. Ve Spojených státech jsou přitom elektřina i zemní plyn násobně levnější než v Evropě. Navíc Evropská komise schvaluje ekonomicky silnějším státům EU státní dotace ocelářskému průmyslu tak, aby ve zdraví prošel bezprecedentní transformací. „*Nejenže nehrajeme na rovném hřišti proti konkurenci ze zemí mimo EU, bohužel ani zápas s evropskou konkurencí není férový,*“ říká k tomu Roman Heide, generální ředitel Třineckých železáren.

Další hrozbou na straně nákladů je růst ceny plynu pro koncové zákazníky kvůli nutnosti sanovat miliardové dluhy předluženého provozovatele plynárenské přepravní soustavy Net4Gas, kterého zprostředkovává kupuje stát. Nárůst cen energií se chystá ve chvíli, kdy výrobci oceli napříč EU čelí velmi složité tržní situaci kvůli poklesu poptávky v klíčových odběratelských odvětvích včetně stavebnictví, nízkým cenám a tlaku dovážené oceli. Objem výroby surové oceli v prvním pololetí v ČR meziročně klesla o 20 %, zatímco produkce dlouhých výrobků, které jsou pro české hutě klíčové, spadla o čtvrtinu. Evropská ocelářská asociace Eurofer odhaduje, že v roce 2023 zjevná spotřeba oceli v EU klesne o 5,3 %, což znamená čtvrtý pokles za posledních pět let.

Vedle dramatického růstu regulovaných složek cen energií vláda v rámci konsolidačního balíčku navrhuje zrušit osvobození některých paliv využívaných v metalurgických procesech od daně na energetické produkty „s dvojnásobným použitím“. Toto osvobození je přitom možné díky výjimce na úrovni EU. Vláda v návrhu státního rozpočtu na rok 2024 nepočítá ani s prostředky na výplatu kompenzace nepřímých nákladů EU ETS, i když to v minulosti slíbila. „*Všechny tyto kroky představují pro české oceláře obrovskou hrozbu v době, kdy se od nich očekávají investice v řádu desítek miliard korun do dekarbonizace,*“ dodává Heide.

- z tiskové zprávy-