

Vliv aplikovaného faktoru intenzity napětí na lomové chování předzatížených C(T) těles v prostředí vysokotlakého vodíku

Effect of Applied Stress Intensity Factor on Fracture Behaviour of Preloaded C(T) Specimens in High-pressure Hydrogen Environment

Ing. Petr Čížek, Ph.D.¹; Ing. Marek Dobiáš^{1,2}; doc. Ing. Petr Jonšta, Ph.D.^{1,2}

¹ MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Pohraniční 693/31, Vítkovice, 703 00 Ostrava, Česká republika

² Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta materiálově-technologická, Katedra materiálového inženýrství a recyklace, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba, Česká republika

Jedním z vysoce aktuálních témat v oblasti materiálového inženýrství je studium odolnosti konstrukčních ocelí vůči vodíkovému zkrěhnutí. Toto téma nachází své uplatnění v oblasti skladování vodíku v tlakových lahvích a zásobnících, kde je při vývoji a optimalizaci materiálů použitých k jejich výrobě možné dosáhnout nemalých ekonomických úspor. Optimalizace může například směřovat ke zvýšení pevnostních vlastností materiálu tlakové láhve, a tím možnosti redukce tloušťky jejich stěny. To však může negativně ovlivnit jeho odolnost vůči vodíkové křehkosti. Studium křehkolomových vlastností konstrukčních ocelí v prostředí vysokotlakého vodíku nabývá na významu i v oblasti transportu vodíku či zemního plynu. V souvislosti s plánovaným využitím vodíku jako alternativního zdroje energie, případně s jeho přimícháváním do zemního plynu za účelem snížení uhlíkové stopy, směřuje zájem provozovatelů ke studiu připravenosti stávající plynárenské infrastruktury na uplatňování této strategie. V obou případech se experimentální stanovení odolnosti materiálu vůči vodíkovému zkrěhnutí dle příslušných standardů provádí několika odlišnými technikami založených na bázi lomové houževnatosti při statickém zatížení a využívajících zkušebních těles s počáteční únavovou trhlinou, které jsou v zásadě velmi podobné pro případ hodnocení tlakových lahví i plynovodního potrubí. Přesto je z literatury i referencí od vlastních výrobců známo, že použitá zkušební metoda má nezanedbatelný vliv na výsledné parametry. Předložený článek se zaměřuje na hodnocení lomového chování na předepnutých C(T) tělesech, která byla zatížena na různé hodnoty faktory intenzity napětí a následně exponována v prostředí vysokotlakého vodíku. Dosažené výsledky byly následně porovnány s metodou pomalého statického zatěžování těles tohoto typu v prostředí vysokotlakého vodíku a posouzena byla relevance použitých metod při zachování konzervativnosti výsledků. Nedílnou součástí hodnocení je v případě zkoušek zaměřených na výskyt vodíkové křehkosti i fraktografická analýza lomových ploch metodou rádkovací elektronové mikroskopie.

Klíčová slova: vodíkové zkrěhnutí; lomová houževnatost; tlakové láhve

One of the latest actual topics in the field of materials engineering is study of the resistance of structural steels to hydrogen embrittlement. This topic finds its application in the field of hydrogen storage in cylinders and tanks, where considerable economic savings can be achieved by developing and optimizing the materials used for their production. Optimization can, for example, be directed towards increasing the strength properties of the cylinder material and thus the possibility of reducing the wall thickness. However, this may adversely affect its resistance to hydrogen embrittlement. The study of brittle fracture properties of structural steels in high-pressure hydrogen environments is also becoming increasingly important in the field of hydrogen or natural gas transport. In the context of the planned use of hydrogen as an alternative energy source, or its blending into natural gas to reduce the carbon footprint, distributors are interested in studying the readiness of existing gas infrastructure to implement this strategy. In both cases, the experimental determination of the material's resistance to hydrogen embrittlement according to the relevant standards is performed by several different techniques based on fracture toughness measurement under static loading and using pre-cracked compact tensile specimens, which are in principle very similar for the case of both cylinder and pipeline evaluation. Nevertheless, it is known from the literature and references from the manufacturers themselves that the test method used has a non-negligible influence on the resulting parameters. The present paper focuses on the evaluation of the fracture behavior on prestressed C(T) specimens that have been loaded to different values of stress intensity factors and subsequently exposed in a high-pressure hydrogen environment. The results obtained were subsequently compared with the slow static loading method for bodies of this type in a high-pressure hydrogen environment and the relevance of the methods used was assessed while keeping the results conservative. Fractographic analysis of the fracture surfaces by scanning electron microscopy is an integral part of the evaluation in the case of hydrogen embrittlement tests.

Key words: hydrogen embrittlement; fracture toughness; pressure vessels

1. Úvod

Odolnost oceli vůči vodíkovému zkrěhnutí patří aktuálně mezi často řešené problémy v materiálovém inženýrství. Vliv působení vysokotlakého vodíku na základní materiál i svarové spoje je předmětem zájmu výrobců tlakových lahví nebo zásobníků na skladování a přepravu vodíku, výrobců armatur, provozovatelů plynárenské infrastruktury a dalších odvětvích zabývajících se přímo vodíkovým hospodářstvím nebo aplikacemi spojenými s přimícháváním vodíku do zemního plynu.

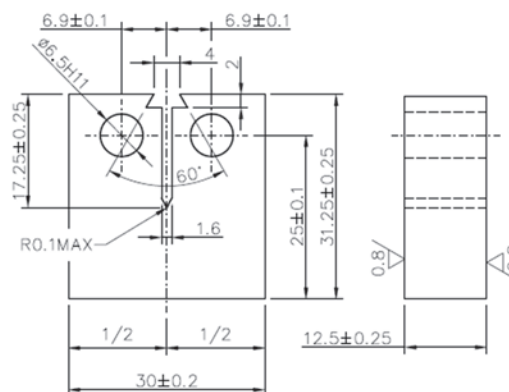
Obecně je uplatnění mechanismu vodíkového zkrěhnutí závislé na mnoha faktorech. Prvním z nich jsou mikrostrukturní charakteristiky materiálu. Například martenzitické oceli jsou výrazně náchylné k vodíkovému zkrěhnutí, méně pak feritické oceli a korozivzdorné austenitické oceli se dají považovat za velmi odolné. V mikrostruktuře má silně nepříznivý vliv na odolnost oceli vůči vodíkovému zkrěhnutí výskyt sulfidických (např. MnS) i oxidických nekovových vměstků. Z tohoto důvodu je nutné omezit obsah S, P a kyslíku. Kromě toho je známo, že protáhlé vměstky jsou horší než vměstky kulového tvaru. Z pohledu chemického složení je pak příznivý obsah niklu a manganu, tedy austenitotvorných prvků. Vliv tepelného zpracování je důležitý zejména u nízkolegovaných ocelí, kde významnou roli hraje popouštěcí teplota. Při aplikaci vyšší popouštěcí teploty dochází ke snížení pevnostních vlastností, a tím pak i ke zvýšení odolnosti vůči vodíkovému zkrěhnutí [1].

Vodíková křehkost je ve své podstatě typem koroze pod napětím, velmi důležitý je tak vliv napětíových charakteristik působících na materiál, případně na čele přítomné trhliny. Bylo pozorováno, že transport vodíku do materiálu se uskutečňuje především pomocí dislokací. Je tak důležité, pokud možno co nejvíce eliminovat oblasti s lokálním nárůstem plastické deformace. V práci [2] byla rovněž pozorována silná závislost prahových hodnot počátku subkritického šíření trhliny na rychlosti zatěžování v prostředí vysokotlakého vodíku. S rostoucí rychlostí zatížení se zvyšovaly prahové hodnoty faktory intenzity napětí. Pro vodíkové křehnutí není, na rozdíl například od celkové koroze, doba expozice až tak významným parametrem. Jak bylo uvedeno, vodík je transportován pomocí dislokací a jeho kritické koncentrace lze dosáhnout za velmi krátkou dobu.

Existují různé normalizované přístupy k hodnocení odolnosti oceli vůči vodíkovému zkrěhnutí, které jsou popsány v normách ČSN EN ISO 11114-4 [3] nebo ASME BPVC-VIII.3 [4]. Standard ČSN EN ISO 11114-4 popisující zkušební metody pro stanovení prahových hodnot faktoru intenzity napětí předepisuje jeho experimentální stanovení pomocí tří odlišných postupů.

Při hodnocení metodou A je vystaveno zkušební těleso tvaru tenkého disku postupně rostoucímu tlaku vodíku až do okamžiku jeho porušení.

Metody B a C pak využívají zkušebních těles typu $\frac{1}{2}$ C(T) známých ze zkoušek lomové houževnatosti, když jejich základní rozměry jsou znázorněny na obr. 1.



Obr. 1 Zkušební těleso typu C(T) používané pro stanovení hodnoty faktoru intenzity napětí v prostředí vysokotlakého vodíku

Fig. 1 C(T) specimen used for determination of stress intensity factor in high-pressure hydrogen environment

Tyto metody jsou však principiálně zcela odlišné. Při metodě B je zkušební těleso upnuto do čelistí zkušebního stroje a vystaveno působení vysokotlakého vodíku o tlaku odpovídajícímu designovému tlaku láhve. Počáteční únavová trhlinka je stupňovitým zatížením rozevírána s nárůstem faktoru intenzity napětí o $1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ v každém kroku a s výdrží 20 minut až do okamžiku detekovaného přírůstu trhlinky nebo porušení zkušebního tělesa. Metoda C využívá jiného postupu, když je zkušební těleso nejprve na vzduchu předepnuto na úroveň faktoru intenzity napětí vycházejícího z jeho meze pevnosti v tahu a následně je exponováno v prostředí vodíku po dobu minimálně 1000 hodin. Po ukončení expozice je vzorek dolomen a metodou řádkovací elektronové mikroskopie je zjišťována délka přírůstu počáteční únavové trhlinky. Aby byl materiál vyhovující, nesmí tento přírůstek přesáhnout délku 0,25 mm.

V experimentálním programu tak bylo provedeno posouzení vlivu způsobu a rychlosti zatěžování na odolnost oceli 34CrMo4, jež je typickou představitelkou materiálu pro výrobu tlakových lahví určených pro skladování a přepravu vysokotlakého vodíku. Zkoušky byly prováděny na modelovém výrobku tlakové láhve, jejíž chemické složení odpovídalo požadavkům na ocel této jakosti dané standardem ČSN EN ISO 683-2, viz tab. 1.

Pozorovaná mikrostruktura byla řádkovitá a velmi nehomogenní, vyskytovaly se v ní oblasti feritu, bainitu i martenzitu.

Tab. 1 Chemické složení experimentálního materiálu z oceli 34CrMo4 (hm. %)

Tab. 1 Chemical composition of experimental material of 34CrMo4 (wt. %)

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo
Požadavky ČSN EN ISO 683-2	0,30-0,37	0,100-0,400	0,60-0,90	≤ 0,025	≤ 0,035	0,90-1,20	≤ 0,400	0,150-0,300
Kontrolní chemická analýza	0,35	0,302	0,78	0,003	<0,001	1,13	0,114	0,203

2. Výsledky zkoušek a jejich diskuse

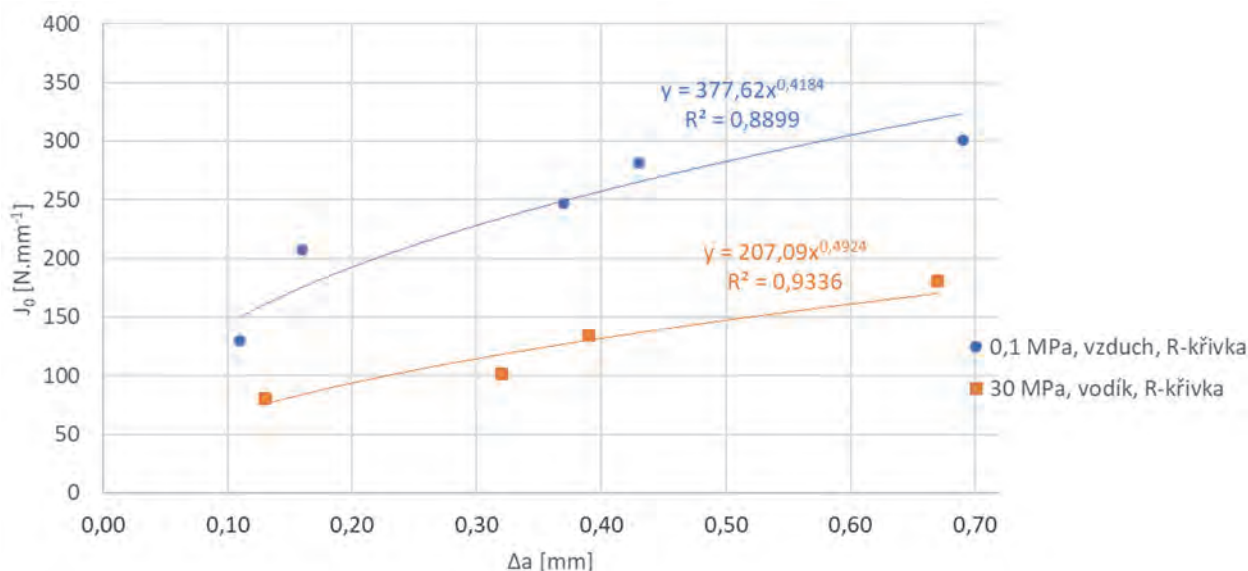
Experimentální program navázal na zkoušky provedené v rámci práce [5]. Základem bylo sestavení J-R křivky na vzduchu. Předpokládaným lomovým chováním oceli 34CrMo4 na vzduchu je stabilní šíření tvárné trhliny. Toto chování je zpravidla experimentálně popsáno pomocí tzv. J-R křivek, závislosti parametru lomové houževnatosti (J-integrál, kritické rozevření čela trhliny) na stabilním přírůstku trhliny. Tato křivka je sestavena na základě zatěžování sady minimálně pěti zkušebních těles, přičemž každé z nich je zatíženo na odlišné rozevření trhliny a je tedy dosaženo různých délek přírůstku trhliny. Každé zkušební těleso je po dosažení zvoleného zatížení odlehčeno, dolomeno v kapalném dusíku a pod měřicím mikroskopem je změřena délka přírůstku trhliny. Pro každé těleso je rovněž vypočítán z normalizovaných vztahů pro měření lomové houževnatosti její příslušný parametr vycházející ze silových poměrů. Výsledkem je pak J-R křivka popsána mocninnou funkcí.

Totéž měření bylo následně provedeno v prostředí vysokotlakého vodíku o tlaku 300 bar, který odpovídá pracovnímu tlaku navržené tlakové láhve. Jak bylo uvedeno v teoretickém přehledu o parametrech majících vliv na vodíkové křehnutí, zkušební rychlost byla o více než jeden řád nižší než u zkoušek na vzduchu. Měření bylo prováděno v akreditované zkušební laboratoři č. 1300 společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s. r. o. s použitím patentovaného vodíkového autoklávu vlastního návrhu i výroby, který byl zabudován do servohydraulického zkušebního zařízení MTS 100 kN. Zkušební těleso bylo nejprve upnuto do čelistí stroje,

následně byl autokláv uzavřen, propláchnut dusíkem a vakuován na tlak nižší než 130 Pa. Poté byl autokláv zaplněn vodíkem na požadovaný pracovní tlak. Po jeho dosažení a 30minutovém sycení bylo spuštěno zatěžování pomalou rychlostí pohybu pístnice zkušebního stroje při současném zaznamenávání závislosti posuv – síla.

Jak je patrné z obr. 2, lomové chování v prostředí vysokotlakého vodíku při statickém zatěžování s rostoucím rozevřením trhliny je významně horší. Nižší je tedy i iniciační hodnota faktoru intenzity napětí. Tato iniciační hodnota je stanovena jako faktor intenzity napětí odpovídající přírůstku trhliny 0,2 mm a činí $151 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ pro prostředí vodíku a $211 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ na vzduchu.

Jak bylo naznačeno v úvodním přehledu, norma ČSN EN ISO 11114-4 předepisuje 3 metody stanovení iniciačních hodnot faktoru intenzity napětí, přičemž jejich výsledky se mezi sebou liší. To bylo popsáno např. v práci [6], kde byly na konstrukční oceli pro výrobu tlakových lahví porovnávány metody B a C. Při následování postupu metody C, tedy předeptnutí zkušebních těles na vzduchu, 1000 - hodinové expozici ve vodíku a změření přírůstku trhliny vykazoval materiál velmi dobrou odolnost vůči stabilnímu růstu trhliny. Na lomové ploše nebyl pozorován žádný přírůstek trhliny. K odlišnému chování došlo při aplikaci metody B, kdy byla zkušební tělesa zatěžována stupňovitým a postupně rostoucím zatížením navyšovaném v každém kroku o $1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Při zatěžování docházelo k výraznému rozvoji trhliny při faktoru intenzity napětí hluboko pod úrovní na vzduchu předeptnutých zkušebních těles dle metody C. V některých případech byla dokonce tělesa porušena náhlým nestabilním lomem, přičemž toto lomové chování nelze při aplikacích v tlakových lahví akceptovat.



Obr. 2 J-R křivky na vzduchu a ve vodíku stanovené metodou pomalého rostoucího zatěžování
Fig. 2 J-R curves determined by slow loading rate in the air and high-pressure hydrogen environment

Navazující experimentální práce na oceli 34CrMo4 a shrnuté v tomto článku tak vedly k pokusu o hodnocení vlivu volby faktoru intenzity napětí na předeptnutých tělesech. Ke zkouškám bylo použito 10 zkušebních těles

typu ½ C(T), která byla předeptnuta na různé úrovně faktoru intenzity napětí. Zatížení bylo zvoleno na základě záznamu síla vs. rozevření trhliny na tělese zatíženém na vzduchu, a to tak, aby byla následně ve vodíku

exponována tělesa jak s předpokladem ostré trhliny (zvolené předepnutí v oblasti lineární části diagramu síla vs. rozevření) i výskytem více či méně výrazné plastické oblasti před čelem únavové trhliny. Na tomto místě je nutné podotknout, že norma ČSN EN ISO 11114-4 předepisuje zatížení těles striktně dle vztahu (1). Tento vztah je poměrně zjednodušený, když prakticky nezohledňuje např. hodnotu meze kluzu v tahu vyjadřující počátek plastických deformací materiálu a mající vliv na tvorbu a velikost plastické zóny na čele počáteční únavové trhliny.

$$K_{IAPP} = 90 \cdot \frac{R_m}{960} \quad (1)$$

kde: K_{IAPP} je aplikovaný faktor intenzity napětí při předepnutí vzorků, $[MPa \cdot m^{1/2}]$

R_m - mez pevnosti v tahu, $[MPa]$

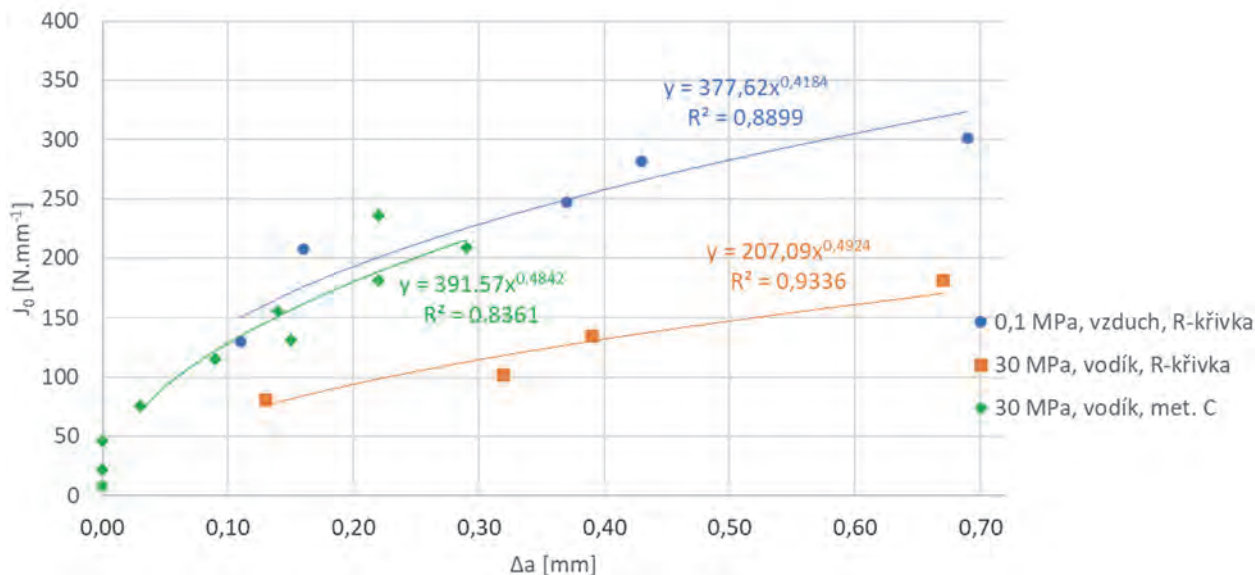
Seznam zatížených zkušebních těles je uveden v tab. 2.

Studovaný materiál disponuje mezi pevnosti v tahu 830 MPa a mezi kluzu 661 MPa. Dle vztahu (1) by tak mělo být zkušební těleso zatíženo na aplikovaný faktor intenzity napětí 78,6 $MPa \cdot m^{1/2}$. Tyto normou předepsané parametry reprezentuje přibližně těleso APK-14. V práci [5] však na zkušebním tělese zatíženém přesně dle vztahu (1) nebyl na lomové ploše pozorován žádný stabilní přírůstek. Dvě zkušební tělesa byla zatížena ještě pod tuto hodnotu a vyjadřovala stav ostré trhliny bez přítomnosti výrazné plastické zóny na čele trhliny. Další zkušební tělesa byla zatížena na vyšší faktory intenzity napětí. V těchto případech však již bylo podstoupeno riziko iniciace růstu trhliny právě již při zatěžování vzorku na vzduchu a bez vodíkové expozice.

Tab. 2 Seznam zatížených zkušebních těles
Tab. 2 List of pre-loaded test specimens

Označení	$K_{IAPP} [MPa \cdot m^{1/2}]$
APK-11	64,3
APK-12	115,4
APK-13	42,2
APK-14	84,0
APK-15	94,7
APK-16	105,2
APK-17	108,5
APK-18	105,5
APK-19	112,3
APK-20	113,8

Předepnutá tělesa byla následně zafixována klíny a exponována ve vodíku o tlaku 300 bar po dobu 1000 hodin. Po jejich vyjmutí z autoklávu a dolomení byly proměřeny délky stabilních přírůstků a pro ilustraci vyneseny do výchozích J-R křivek z obr. 2. Porovnání je znázorněno na obr. 3. Z tohoto obrázku je patrné, že naměřené výsledky jsou v relativně dobrém souladu s J-R křivkou stanovenou na vzduchu. Přírůstek trhliny byl přitom pozorován až počínaje zatížením vzorku APK-15 s aplikovaným faktorem intenzity napětí 94,7 $MPa \cdot m^{1/2}$. Bylo tedy potvrzeno, že normou předepsané předepnutí zkušební tělesa nevedlo k iniciaci růstu trhliny. Naměřený soubor dat však bylo nutné doplnit i fraktografickým rozbohem, jehož účelem bylo posouzení vlivu vodíku na subkritický růst trhliny.



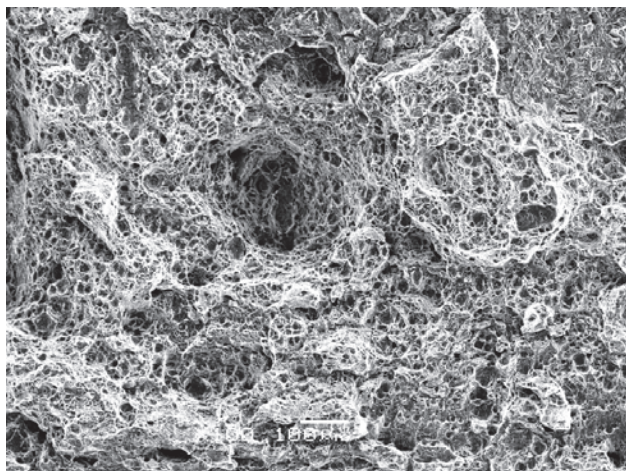
Obr. 3 J-R křivky doplněné o soubor výsledků dosažených na předepnutých C(T) tělesech po 1000 - hodinové expozici ve vodíku o tlaku 300 bar
Fig. 3 J-R curves with data set of pre-loaded C(T) specimens after 1000 hrs. exposure in high-pressure hydrogen environment

V oblasti stabilního růstu trhliny na zkušebních tělesech zatěžovaných na vzduchu byl dle předpokladů pozorován transkrystalický tvárný lom s jamkovou morfologií (obr. 4). Toto chování je typické pro konstrukční oceli podobných jakostí.

Odlišné lomové chování bylo zjištěno na zkušebních tělesech zatěžovaných v prostředí vodíku o tlaku 300 bar za použití metod měření lomové houževnatosti (J-R křivky). V oblasti přírůstku trhliny byla lomová plocha tvořena jemným transkrystalickým štěpným lomem. Tento

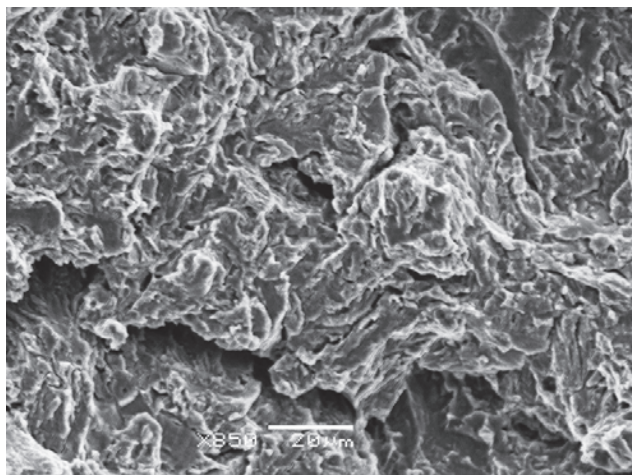
typ lomového chování je méně příznivý, ale vysvětluje sníženou iniciační hodnotu pro počátek stabilního šíření trhliny i polohu J-R křivky ve vodíku ve srovnání s J-R křivkou na vzduchu. Dokumentace lomové plochy na vybraném zkušebním tělese zatěžovaném ve vodíku je uvedena na obr. 5.

Konečně poslední část fraktografických analýz byla věnována zkušebním tělesům zatížených na rozdílné velikosti faktoru intenzity napětí a exponovaných 1000 hodin v prostředí vodíku o tlaku 300 bar. K hodnocení byla vybrána tělesa s menšími i většími přírůstky trhliny, které odpovídali i aplikovaným zatěžovacím parametrům. Na zkušebních tělesech byly naměřeny stabilní přírůstky v rozmezí od 0 do 0,29 mm. Pokud byl stabilní přírůstek pozorován, byl ve všech případech bez ohledu na hodnotu aplikovaného zatížení před vodíkovou expozicí tvořen transkrystalickým tvárným lomem s jamkovou morfologií. Jedná se tedy o stejný typ lomového chování jako na vzduchu. Dokumentace lomové plochy na zkušebním tělese APK-12 s největším rozevřením trhliny je uvedena na obr. 6.



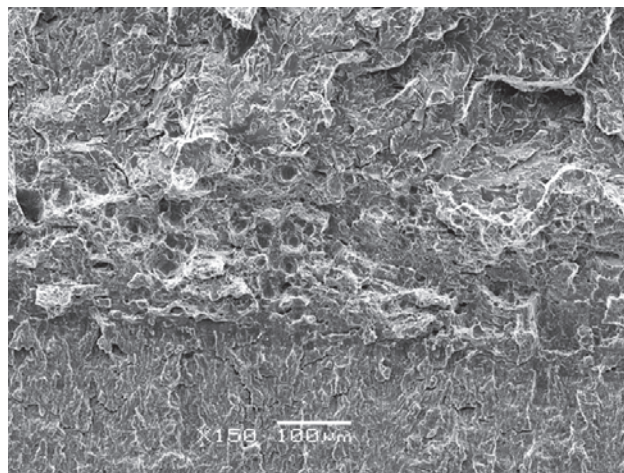
Obr. 4 Transkrystalický tvárný lom s jamkovou morfologií pozorovaný na zkušebním tělese zatíženém na vzduchu

Fig. 4 Transcrystalline ductile fracture with pitting morphology observed in the sample loaded in the air



Obr. 5 Transkrystalický štěpný lom detekovaný v oblasti přírůstku trhliny na zkušebním tělese zatěžovaném ve vodíku

Fig. 5 Transcrystalline cleavage fracture detected in the stable crack growth area of a test specimen loaded in hydrogen



Obr. 6 Oblasti počáteční trhliny, jejího stabilního přírůstku tvořeného transkrystalickým tvárným lomem a oblast dolomení na vzorku APK-12 ($K_{IAPP} = 115,4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)

Fig. 6 Areas of the initial crack, its stable crack growth formed by transcrystalline ductile fracture and the area of final break on sample APK-12 ($K_{IAPP} = 115,4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)

Z prezentovaných výsledků je zřejmé, že významnou roli pro hodnocení křehkolomového chování konstrukčních ocelí používaných pro výrobu tlakových lahví hraje použitá metoda zkoušení. Metoda C dle ČSN EN ISO 11114-4 využívá zatěžování zkušebních těles s počáteční únavovou trhlinou, na nichž se během vodíkové expozice nemění velikost vnějšího aplikovaného zatížení. Předepnutí vzorků je dáno normalizovaným vztahem (1), který je velmi obecný a jak je z výsledků zřejmé, jeho relevance je více než diskutabilní. Například závislost prahových hodnot faktoru intenzity napětí na mezi kluzu byla přitom prokázána v práci [7] na širší škále materiálů s různými mezemi kluzu a při tlaku vodíku 103 MPa s výsledkem, že prahová hodnota faktoru intenzity napětí klesá s rostoucí mezí kluzu. Pro zkoušky bylo dále použito 10 vzorků, které byly zatíženy na rozdílné hodnoty faktoru intenzity napětí, přičemž na tělese zatíženém na faktor intenzity napětí dle vztahu (1) nebyl pozorován žádný přírůstek trhliny. Poloha bodů v J-R křivkách odpovídající 10 předepnutým tělesům po 1000 - hodinové expozici totiž v podstatě odpovídá J-R křivce naměřené na vzduchu a vzhledem k výskytu transkrystalického tvárného lomu se lze domnívat, že k přírůstku trhliny došlo právě již při předepnutí zkušebních těles na vzduchu. Naopak přítomnost menší plastické zóny před čelem trhliny odpovídající nižším faktorům intenzity napětí nevede k významnějším projevům vodíkové křehkosti, protože na těchto tělesech nedošlo k šíření trhliny, a to žádným mechanismem.

Jak je tedy zřejmé, stanovení prahových či iniciačních hodnot faktoru intenzity napětí v prostředí vysokotlakého vodíku je velmi komplexní proces, v němž rozhodující roli hraje historie, způsob a rychlost zatěžování a rovněž prostředí, ve kterém probíhá zatěžování zkušebních těles. Významný vliv přitom hrají deformace akumulované na čele trhliny při statickém předepnutí zkušebních těles, které mohou následně ovlivňovat lomové parametry pro iniciační hodnoty faktoru intenzity napětí. V literatuře jsou rovněž uváděny hypotézy pro absenci subkritického růstu

trhliny při faktorech intenzity napětí vyšších než prahových. Jednou z nich je vodíkem indukované větvení čela počáteční trhliny, přičemž vzniklá napěťová a deformační pole působí proti šíření trhliny [8]. Dalším fyzikálním procesem ovlivňujícím šíření počáteční trhliny je otupení jejího čela vlivem působícího napětí při předzátížení, a tím snížení napětí na čele trhliny [7].

3. Závěr

Předložený článek se zabývá vlivem vlivu působení vodíku na stanovení iniciačních hodnot faktoru intenzity napětí na konstrukční oceli 34CrMo4 a přímo navazuje na dříve prováděné experimentální práce v této oblasti. Tato ocel patří mezi typické představitelky pro výrobu tlakových lahví, které jsou certifikovány dle standardu ČSN EN ISO 11114-4. Ten obsahuje tři zkušební metody, přičemž minimálně dvě z nich ověřované v laboratořích společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s. r. o. vedou ke zcela rozdílným naměřeným parametrům. Již dříve bylo prokázáno, že použití metody C sestávající z 1000 - hodinové expozice předepnutých zkušebních těles vede k významně lepším výsledkům, tedy k vyšším iniciačním hodnotám. Velikost předzátížení těles je přitom dána poměrně zjednodušeným vztahem vycházející z jediného parametru, a to meze pevnosti v tahu. V experimentální části bylo použito 10 vzorků, které byly zatíženy na různé hodnoty faktory aplikovaného faktoru intenzity napětí. Na tělesech se zatížením odpovídajícím normalizovanému vztahu nedošlo k žádnému šíření trhliny, na výše zatížených tělesech již byl přírůstek pozorován, nicméně na lomových plochách zkušebních těles byla v oblasti přírůstku trhliny zjištěna transkrystalická štěpná morfologie, která spíše popírá šíření působením vysokotlakého vodíku. Naopak metodou pomalého zvyšujícího se zatížení zkušebních těles za současného působení vysokotlakého vodíku pomocí technik pro měření lomové houževnatosti bylo dosaženo výrazně nižších iniciačních hodnot a lomová plocha tvořena transkrystalickým štěpným lomem poukazuje na mnohem výraznější vliv spolupůsobení vodíku.

Vzhledem k tomu, že v technologickém procesu plnění a vypouštění tlakových lahví jsou tyto vystaveny účinku spolupůsobení mechanického zatížení a vodíkového prostředí, se jeví použití metody se statickým a pomalu se navyšujícím zatížením in-situ ve vodíku jako relevantnější. Minimálně je lze označit jako konzervativnější z pohledu naměřených nižších hodnot, což je důležité především pro zajištění bezpečnosti jejich provozu.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci Institucionální podpory dlouhodobého a koncepčního rozvoje výzkumné organizace v roce 2024, kterou poskytlo Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky.

Literatura

- [1] NIBUR, K. A., SOMERDAY, B. P., SAN MARCHI, Ch., FOULK J. W. III, DADFARNIA, M. and SOFRONIS, P. The Relationship Between Crack-Tip Strain and Subcritical Cracking Thresholds for Steels in High-Pressure Hydrogen Gas, *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, 2012.
- [2] GANGLOFF, R.P. Hydrogen Effects on Materials Behavior and Corrosion, Deformation Interactions, *The Minerals, Metals and Materials Society*, Warrendale, PA, (2003), pp. 477–97.
- [3] ISO 11114-4: 2018 *Transportable gas cylinders – Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents – Part 4: The test methods for selecting metallic material resistant to hydrogen embrittlement*, 2018.
- [4] ASME BPVC VIII.3-2021: *Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels*, 2021.
- [5] DOBIÁŠ, M., ČÍŽEK, P. a JONŠTA, P. Přístupy k hodnocení lomové houževnatosti konstrukčních ocelí v prostředí vysokotlakého vodíku, *Hutnické listy*, 76 (2023) 4-6, ISSN 0018-8069, 2023.
- [6] ČÍŽEK, P. and KANDER, L. *Fracture Behavior of 34CrMo4 Steel In High-Pressure Hydrogen Environment*, In *METAL 2020, 29th International Conference on Metallurgy and Materials*, 2020, s. 597-602. Brno.
- [7] LONGINOW, A. W. and PHELPS, E. H. *Corrosion*, 31 (1975), pp. 404–12.
- [8] NIBUR, K. A., SOMERDAY, B.P., SANMARCHI, Ch, and BALCH, D.K. In: *Proceedings of 2008 ASME Pressure Vessels and Piping Division, Conference*, PVP2008-61298, 2008.

Trumpova agenda ocelářského průmyslu

Znovuzvolení prezidenta Donalda Trumpa v roce 2024 má významné důsledky pro americký ocelářský průmysl. Očekává se, že jeho politika „Amerika na prvním místě“, včetně cel a obchodních omezení, bude v nadcházejících letech utvářet podobu tohoto sektoru. Ve své kampani kladl prezident Trump důraz na revitalizaci americké výroby, přičemž ocelářský průmysl hrál ústřední roli v jeho ekonomické vizi. Jeho znovuzvolení tak slibuje pokračování a potenciální rozšíření politik implementovaných během jeho prvního funkčního období, včetně zachování a případné zvýšení cel na dovoz oceli, podpory domácí výroby oceli, řešení obchodní nerovnováhy zejména s Čínou a potenciálního blokování zahraničních akvizic amerických ocelářských společností.

Stav ocelářského průmyslu USA v roce 2024:

- Roční výroba oceli - 86 milionů metrických tun
- Zaměstnanost ocelářského průmyslu - 85.300 pracovníků
- Dovoz oceli - 26 milionů metrických tun
- Vývoj oceli - 7 milionů metrických tun

Zdroj: *Steel Industry News*