

## Hodnocení odolnosti konstrukčních ocelí vůči vodíkovému zkrěhnutí v podmínkách MMV

### Evaluation of hydrogen embrittlement resistance of structural steels at MMV

Ing. Petr Čížek, Ph.D.; Ing. Marek Dobiáš; Ing. Jan Kander

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

Článek se věnuje vysoce aktuální problematice hodnocení odolnosti konstrukčních ocelí vůči vodíkové křehkosti. Vodík je v současnosti považován za významný alternativní zdroj energie. V souvislosti s cílem přimíchávání vodíku do zemního plynu za účelem snížení uhlíkové stopy je v mnoha případech nezbytné ověřit schopnost materiálu plynovodního potrubí a jeho svarových spojů odolávat působení tlakového vodíku, a to zejména s důrazem na materiály stávající plynovodní sítě po mnohaletém provozu a nižší metalurgické kvalitě. Hodnocení odolnosti materiálu vůči vodíkovému zkrěhnutí se však uplatňuje i v dalších odvětvích zabývajících se skladováním a transportem vodíku, jmenovitě výrobě tlakových lahví nebo zásobníků, kde jsou výzkumné aktivity zaměřovány na zařazení materiálů s vyšší pevností a odolávají vyšším tlakům vodíku v láhvi (až 1100 bar). Existuje celá řada metod posuzování odolnosti materiálu vůči působení vysokotlakého vodíku, ať už normalizovaných, nebo vycházejících z principů lomové mechaniky nebo kinetiky šíření únavové trhliny. Laboratoř společnosti MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s. r. o. se zabývá materiálými zkouškami v prostředí vysokotlakého vodíku od roku 2015 a disponuje vodíkovými autoklávy vlastního návrhu i výroby pro jejich provádění. V článku jsou shrnuty základní metody zkoušení odolnosti materiálu vůči vodíkové křehkosti demonstrovány na oceli 34CrMo4 používané pro výrobu tlakových lahví, a to jak dlouhodobé expoziční zkoušky zatížených i nezatížených těles i zkoušky in-situ v prostředí vysokotlakého vodíku a využití miniaturizovaných zkušebních těles. Ambicemi laboratoře je další rozvoj zkušebních technik i parametrů zkoušky za účelem přizpůsobení se požadavkům průmyslových partnerů a aplikace výsledků na konkrétní komponentu působící v plynárenském průmyslu. V průběhu experimentálních prací byla pozorována vyšší náchylnost materiálu k degradaci jeho vlastností v důsledku vodíkového zkrěhnutí na vzorcích s trhlinou zatěžovaných in-situ v prostředí vysokotlakého vodíku ve srovnání se vzorky po dlouhodobém sycení.

**Klíčová slova:** vodíkové zkrěhnutí; lomová mechanika; rychlost šíření únavové trhliny

Paper deals with actual topic of hydrogen embrittlement resistance of structural steels. Hydrogen is considered to be a significant source of alternative energy. In connection with the objective of hydrogen addition to natural gas to reduce the carbon emissions, in many cases it is necessary to verify the ability of the pipeline material and its welded joints to withstand the effects of pressurized hydrogen, with emphasis on the materials of the existing pipeline network after many years of operation and of lower metallurgical quality. However, the assessment of material resistance to hydrogen embrittlement has also been applied in other hydrogen storage and transport industries, namely the manufacture of cylinders or storage tanks, where research activities are focused on the usability of higher strength materials to withstand higher hydrogen cylinder pressures (up to 1100 bar). There are several methods for assessing material resistance to high pressure hydrogen, either standardized or based on fracture mechanics principles or fatigue crack growth rate. The laboratory at MATERIAL AND METALLURGICAL RESEARCH Ltd. has been engaged in material testing in the high-pressure hydrogen environment since 2015 and has hydrogen autoclaves of its own design and manufacture for their performance. This paper summarizes the basic methods of testing material resistance to hydrogen embrittlement demonstrated on 34CrMo4 structural steel used for the production of cylinders, both long-term exposure tests of loaded and unloaded bodies as well as in-situ tests in a high-pressure hydrogen environment and the use of miniaturized test bodies. The ambition of the laboratory is to further develop test techniques and test parameters. During experimental program was concluded that test methods performed on specimens with initial crack provide more significant effect of hydrogen embrittlement in comparison with long term exposure tests in high-pressure hydrogen environment.

**Key words:** hydrogen embrittlement; fracture mechanics; hydrogen embrittlement rate; fracture mechanics; fatigue crack propagation speed

### 1. Úvod

Aby se evropské země vyhnuly závislosti na fosilních palivech, jeví se jako nezbytné nahradit současné zdroje energie obnovitelnými zdroji, které jsou šetrnější ke

klimatu a snižují uhlíkovou stopu. Jednou z těchto možností je využití vodíku jako „nosiče energie“, což však vyžaduje také bezpečnou a dobře rozvinutou infrastrukturu pro jeho přepravu a skladování. Pro přepravu plynů v rámci Evropy je již k dispozici rozsáhlá síť potrubí, jehož

značnou část lze využít i pro transport vodíku. Předpokládá se, že 75 % stávající evropské potrubní sítě bude následně využito i pro přepravu vodíku, zbývajících 25 % bude znovu vystavěno z nových materiálů.

Využití vodíku jako nosiče energie vyžaduje účinný distribuční systém. Stávající potrubí z konstrukčních ocelí lze považovat za spolehlivé a hospodárné, jeho nevýhodou je však vliv difúze atomárního vodíku materiálem.

Na národní úrovni je v současnosti k transportu zemního plynu využívána plynovodní soustava instalovaná v mnoha případech před téměř 50 lety, přičemž poplatné době (a tím i schopnost odolávat čistému vodíku) je jak kvalita materiálu potrubí, tak svařovací postupy. Pro následování trendu přímíchávání vodíku do zemního plynu a možnosti využití stávající sítě, což se z ekonomického hlediska jeví výhodněji než výstavba nové, je tak nezbytná znalost odolnosti materiálu a svarových spojů vůči vodíkovému zkřehnutí v přímé vazbě na aktuální stav provozovaného materiálu.

Rovněž z pohledu skladování vodíku nabývá na významu hodnocení odolnosti materiálu vůči vodíkovému zkřehnutí. V souvislosti s přechodem na CO<sub>2</sub> neutrální technologie se jako technicky realizovatelná alternativa jeví využití vodíku pro pohon strojů a zařízení, která jej budou spalovat konvenční cestou nebo pomocí palivových článků. Perspektivní aplikace jsou například silniční vozidla pro osobní na nákladní dopravu, u kterých je vodík uchováván pod vysokým tlakem v řádech stovek barů v zásobnících integrovaných do podvozku. Jde o tlustostěnné bezešvé tlakové lahve vyrobené z oceli, případně o kombinaci použití oceli a kompozitu.

S přihlédnutím k předpokládanému využití vodíku jako alternativního zdroje energie, je tedy v současnosti kladen důraz na výzkum a vývoj materiálu pro uskladnění vodíku v tlakových lahvích a zásobnících. Ten je, i z ekonomických důvodů, orientován především na zvýšení tlaku vodíku v lahvi a použití materiálů s vyšší mezí pevností (i nad 1100 MPa).

Iniciace poškození materiálu za spolupůsobení vysokotlakého vodíku začíná na mikrostrukturní úrovni ve formě trhlin, které se šíří materiálem potrubí a snižují jeho schopnost odolávat působícímu tlaku plynu, což může v konečném důsledku vést ke ztrátě integrity materiálu. Tématu vodíkové křehkosti, jako vysoce aktuálnímu předmětu zájmu v oblasti materiálového inženýrství, se věnovala celá řada renomovaných vědeckých časopisů, ve kterých se např. publikace [1-3] věnují jejímu mechanismu jako společné interakci stavu napjatosti, mikrostruktury materiálu a jeho vystavení působení prostředí čistého vodíku, přičemž svoji roli zde hraje i tlak vodíku.

V roce 2015 se společnost MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s. r. o. (dále MMV) začala intenzivně věnovat výzkumu a vývoji zkušebních metod pro hodnocení odolnosti materiálu vůči vodíkovému zkřehnutí v reakci na poptávku výrobce tlakových lahví pro skladování a transport vodíku na měření rychlosti růstu únavové trhliny v prostředí vysokotlakého vodíku. Výsledkem byl

návrh a výroba vlastního zkušebního zařízení sestávající z tlakové nádoby, kterou bylo možné zabudovat do servo-hydraulického zkušebního stroje, případně používat ve statickém režimu pro expoziční zkoušky. Zařízení o objemu 0,55 litru bylo navrženo pro maximální tlak vodíku v autoklávu 300 bar a bylo patentováno v roce 2017.

S rostoucími požadavky zákazníků z oboru vodíkového hospodářství se rozrostlo portfolio služeb i o vývoj dalších zkušebních metod pro zkoušení materiálů v prostředí vysokotlakého vodíku. V současné době je tak MMV schopno provádět tahové zkoušky, únavové zkoušky, měření lomové houževnatosti i rychlosti šíření únavové trhliny, vše in-situ v prostředí vysokotlakého vodíku. Ve statickém režimu mimo pracovní stroj je možné exponovat zatížené i nezatížené vzorky, případně hodnotit vliv vysokotlakého vodíku na odolnost povlakových vrstev.

Článek nabízí průřez zkušebními metodami použitelnými pro hodnocení odolnosti oceli vůči vodíkovému zkřehnutí, demonstrovány na oceli 34CrMo4 jako jedné ze základních představitelk materiálů pro výrobu tlakových lahví pro skladování a transport vodíku. Věnuje je jak zkoušením těles s počáteční únavovou trhlinou, tak i dlouhodobému sycení vzorků v prostředí vysokotlakého vodíku s následným provedením standardních zkoušek. V závěru článku je okrajově zmíněna možnost využití miniaturizovaných zkušebních těles.

## 2. Výsledky zkoušek a jejich diskuse

Jako zkušební materiálu bylo použito segmentu tlakové lahve z oceli 34CrMo4. Pro navýšení souboru výsledků byl segment rozdělen na 5 kroužků, které byly dále žihány při různých teplotách s výdrží 1 hodiny. Režimy tepelného zpracování jsou, spolu s hodnotami základních mechanických vlastností pro každý stav, uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Teploty žihání a základní vlastnosti experimentálního materiálu  
Tab. 1 Annealing temperatures and basic mechanical properties of tested material

Označení	Žihací teplota	Doba výdrže	R <sub>m</sub>	R <sub>eH</sub>	A	Z
	[°C]		[hod]	[MPa]		[%]
1	300	1	1064	986	12	65
2	200		1058	986	13	67
3	400		1043	967	13,5	68
4	500		1045	967	10	65
5	600		952	875	16	70

Na všech pěti materiálových stavech byla následně provedena zkouška rázem v ohybu za účelem stanovení přechodové teploty. Výsledné hodnoty přechodových teplot pro všech pět materiálových stavů jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Přechodová teplota stanovená zkouškou rázem v ohybu  
Tab. 2 Transition temperature determined by Charpy impact test

Označení režimu TZ	1	2	3	4	5
T <sub>150%SFA</sub> [°C]	-92	-90	-93	-91	-104

Z tab. 1 a tab. 2 je patrné, že k výraznější změně základních mechanických a křehkolomových vlastností dochází až při žíhací teplotě 600 °C. Posuzovaný materiál se zároveň vyznačuje velmi dobrou odolností proti křehkému porušení v rozsahu provozních teplot.

Metody stanovení hodnocení odolnosti materiálu vůči vodíkovému křehnutí lze v základním přiblížení rozdělit na dvě skupiny, a to zkoušky in-situ v prostředí vysokotlakého vodíku a zkoušky provedené na tělesech po dlouhodobé expozici (sycení) ve vysokotlakém vodíku.

Zkouška rázem v ohybu patří mezi základní materiálové zkoušky, zároveň náchylnost materiálu k vodíkovému zkřehnutí může být významným faktorem při zajištění bezpečnosti provozu komponent vystaveným prostředí vysokotlakého vodíku. V tomto případě nelze provádět zkoušky in-situ v prostředí vysokotlakého vodíku, jedinou aplikovatelnou metodou je nasycení materiálu vodíkem a následné provedení zkoušky na Charpyho kyvadlovém kladivu. V podmínkách MMV probíhá sycení vzorků dlouhodobou expozicí v prostředí vysokotlakého vodíku. Doba expozice před vlastní zkouškou není pro zkoušku rázem v ohybu dána žádnou konkrétní specifikací, pro experiment tak byla zvolena expozice po dobu 1000 hodin při tlaku vodíku 150 bar. Tato perioda respektuje specifikace pro zkoušení lomového chování tlakových lahví dle normy [4] a plynovodního potrubí [5].

Autokláv je před expozicí vzorků propláchnut dusíkem za účelem vytěsnění vzduchu a následně odvakován na tlak nižší než 130 Pa. Poté je do něj přiveden z tlakové láhve přes redukční ventil a rozvodný panel s dalšími ventily manometru vodík o požadovaném tlaku. Po ukončení expozice jsou vzorky z autoklávu vyjmuty a neprodleně je, vzhledem k vysokému difuznímu koeficientu vodíku, provedena vlastní zkouška. V případě zkušebního materiálu byla zkouška realizována za pokojové teploty a teploty -100 °C odpovídající tranzitní oblasti Vidalovy křivky. Po dlouhodobé expozici zkušebních těles typu Charpy a jejich následnému testování po vyjmutí z autoklávu, byl výraznější pokles křehkolomových vlastností pozorován pouze v případě stavu po žíhání při teplotě 600 °C, kdy byla lomová plocha tvořena kompletně křehkým lomen a absorbovaná energie poklesla z 55 na 27 J. Ve všech ostatních případech nebyla zjištěna významná degradace křehkolomových vlastností vlivem působení vysokotlakého vodíku.

Důležitými metodami pro hodnocení degradace materiálových vlastností komponent vystaveným prostředím vysokotlakého vodíku, je využití přístupů lomové mechaniky a zkoušky zaměřené na rychlost růstu únavové trhliny. Obě metody využívají zkušebních těles s únavovou trhlínou simulující a priori vadu. Především v případě provozovaných komponent v plynovodní síti, které po mnohaletém provozu mohou obsahovat defekty (i v jejich svarových spojích), se jeví tyto metody jako klíčové.

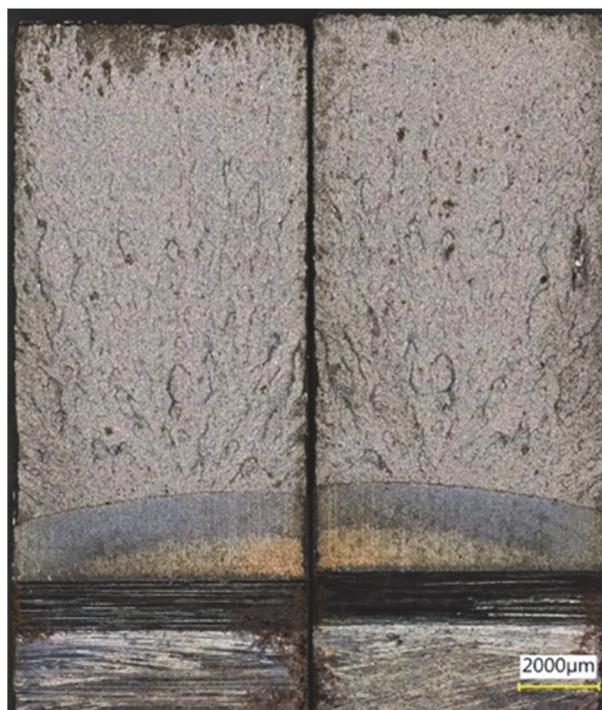
Existují tři metody pro hodnocení lomového chování se dle standardu [4]. Metoda A je založena na postupném navýšování tlaku vodíku na těleso tvaru disku až do jeho

porušení. Metoda B má nejbližší standardizovaným metodám pro měření lomové houževnatosti, když je těleso typu C(T) stupňovitě zatěžováno in-situ v prostředí vysokotlakého vodíku až do známek významného šíření trhliny či křehkého poručení. Metodou C jsou zkoušena modifikovaná tělesa typu C(T), které jsou předepnuta na předepsanou hodnotu aplikovaného faktoru intenzity napětí a exponována ve vodíku po dobu minimálně 1000 hodin. Po vyjmutí z autoklávu jsou tělesa dolomena a na řádkovacím elektronovém mikroskopu jsou měřeny přírůstky počáteční trhliny. MMV disponuje vybavením k provádění metod B a C, přičemž ambicí pro následující období je poskytování kompletních služeb vývojem komory a následným zařazením metody A mezi akreditované zkušební metody.

Nejčastěji používanou je metoda C, kdy je zkušební těleso předepnuto na standardem předepsanou hodnotu síly, případně rozevření trhliny a následně exponováno v autoklávu. Zafixování rozevřeného tělesa může být řešeno klínou nebo šroubem a čepem.

Zkušební tělesa jsou zatížena na hodnotu aplikovaného faktoru intenzity napětí, který vychází z meze pevnosti v tahu zkoušeného materiálu.

V případě tlakové láhve z materiálu 34CrMo4 byly touto metodou zatíženy pouze dvě sady zkušebních těles v dodaném stavu bez dodatečného žíhání, a to na hladiny faktoru intenzity napětí cca 63 a 95 MPa.m<sup>1/2</sup>. Pouze nepatrný přírůstek únavové trhliny byl naměřen na zkušebních tělesech zatížených na vyšší hladinu, a to v řádu setin mm, který spíše reprodukuje otupení čela trhliny při zatížení, což dokumentuje i obr. 1 pořízený opticko – digitálním mikroskopem KEYENCE.



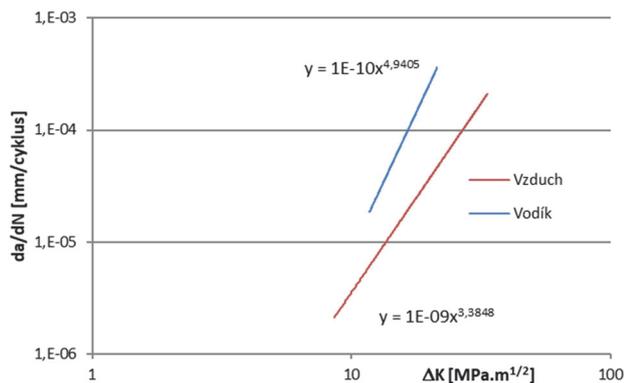
Obr. 1 Fraktografický rozbor C(T) tělesa pouze s nepatrným stabilním přírůstkem počáteční trhliny

Fig. 1 Fractographical analysis of C(T) specimen with only small stable crack growth

V předchozích pracích prováděných na MMV [6] však bylo zkoušení na tomtéž materiálu provedeno i metodou B využívající postupného zatěžování vzorků in-situ v prostředí vysokotlakého vodíku, a to s významně horšími výsledky. Nejen že docházelo k výraznému rozvoji počáteční únavové trhliny při statickém zatížení, ale rovněž byla některá zkušební tělesa porušována náhlým nestabilním lomem. Kompatibilita v hodnocení odolnosti materiálu vůči vodíkovému zkrěhnutí mezi jednotlivými metodami uvedenými v normě [4] by tak měla být vzhledem k rozdílům v jejich provedení prověřována další výzkumnou činností.

Měření rychlosti šíření únavové trhliny je v podmínkách MMV realizováno rovněž na 1/2 C(T) tělesech. Autokláv je v tomto případě zabudován do servohydraulického zkušebního zařízení MTS 100 kN. Po upnutí tělesa do zkušebního stroje je podobným postupem jako v případě použití autoklávu ve statickém režimu autokláv natlakován vodíkem. Následně je vzorek mírně předeprnut za účelem protržení oxidického filmu na čele trhliny a vzorek je dalších 30 minut exponován před začátkem vlastního únavového zatěžování. To je pak realizováno frekvencí nepřesahující 8 Hz. Zatížení i asymetrie cyklu mohou být stanoveny výpočtem na základě opakovaných cyklů při vypouštění a napouštění tlakové láhve [7]. V uzavřeném prostoru autoklávu je přírůstek trhliny snímán potenciálovou měřicí metodou, když jsou na zkušebním tělese přivařeny měřicí, referenční a napájecí elektrody.

Výsledkem zkoušky je stanovení mocninných křivek závislosti rychlosti růstu trhliny na změně rozkmitu faktoru intenzity napětí a vyjádřených rovnicí dle Paris-Erdoganova vztahu. Na dodaném stavu materiálu 34CrMo4 bylo měření provedeno na vzduchu i v prostředí vodíku o tlaku 100 bar v práci [8] při součiniteli asymetrie cyklu  $R = 0,1$  a srovnání obou křivek je uvedeno na obr. 2.



Obr. 2 Porovnání rychlosti šíření únavové trhliny na vzduchu a v prostředí vodíku o tlaku 150 bar

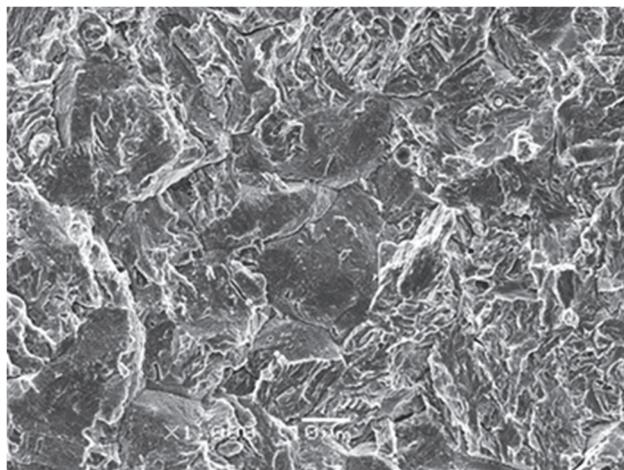
Fig. 2 Comparison of fatigue crack growth rate in the air and in hydrogen at 150 bar

Z naměřených dat jasně vyplývá vyšší rychlost růstu trhliny v prostředí vysokotlakého vodíku, které s lze kvantifikovat indexem vodíkového zkrěhnutí HEE, který je vypočítán pro tři zvolené hodnoty faktoru intenzity napětí v tab. 3.

Tab. 3 Kvantifikace vlivu vodíku na rychlost šíření únavové trhliny  
Tab. 3 Quantification of hydrogen effect on fatigue crack growth rate

$\Delta K$ [MPa $m^{0,5}$ ]	da/dN [mm/cyklus]		HEE
	vodík	vzduch	
10	$8,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	3,59
20	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	10,57
25	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$	14,95

Z obr. 2 a tab. 3 je patrné, že s rostoucí hodnotou rozkmitu faktoru intenzity napětí dochází k intenzivnějšímu vlivu prostředí vysokotlakého vodíku. Na obr. 3 je pak dokumentována lomová plocha v oblasti únavové trhliny, na níž byly pozorovány znaky interkrystalického lomu typické pro poškození za účasti vodíku.

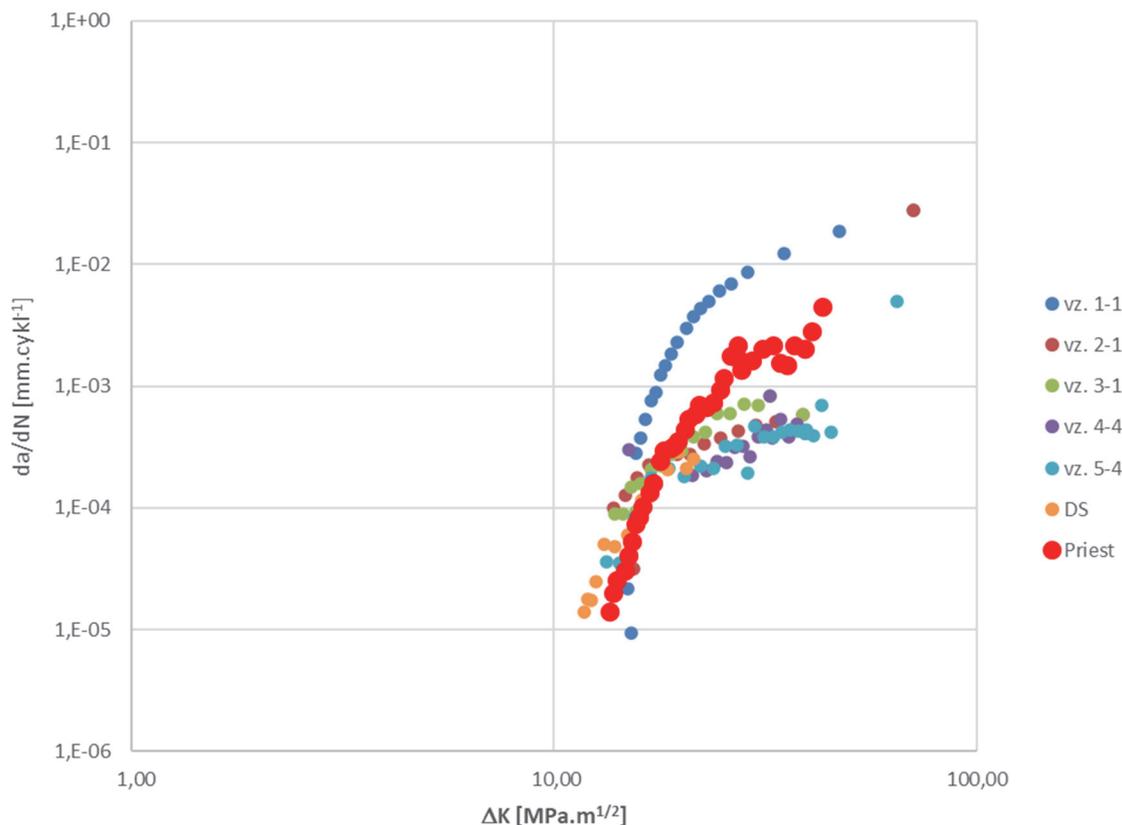


Obr. 3 Znaky interkrystalického lomu na zkušebním tělese po zkoušce rychlosti šíření únavové trhliny v prostředí vysokotlakého vodíku

Fig. 3 Intercrystalline fracture on specimen fracture surface after fatigue crack growth rate measurement in high pressure hydrogen environment

Tytéž zkoušky byly dále provedeny na žíhaných segmentech, a to pouze v prostředí vodíku o tlaku 150 bar. Křivky rychlosti šíření trhliny jsou znázorněny na obr. 4, přičemž oranžovými body v křivce je vyznačen dodaný stav materiálu bez dodatečného žíhání a červenými body pak křivka naměřená Priestem v publikaci [9] pro 1% CrMo oceli, ve které bylo měření provedeno v prostředí vodíku o tlaku 150 bar frekvencí 10 Hz. V publikaci je rovněž studován vliv frekvence cyklování na rychlost šíření trhliny, přičemž s nižší frekvencí cyklování jsou křivky posunuty směrem k vyšším hodnotám rychlosti šíření. Při použití frekvence 8 Hz lze tak považovat výsledky za kvantitativně srovnatelné.

Z výsledků lze pozorovat pouze minimální rozdíly v průběhu rychlosti růstu únavové trhliny mezi všemi stavy. Vyšších rychlostí bylo dosaženo pouze u žíhaného stavu při teplotě 300 °C, což lze vzhledem k podobnému charakteru lomu přisuzovat spíše heterogenitám ve studovaném materiálu.



Obr. 4 Porovnání rychlosti růstu únavové trhliny pro různé stavy materiálu 34CrMo4  
Fig. 4 Comparison of fatigue crack growth rate curves for different states of 34CrMo4 steel

### 3. Závěr

Článek seznamuje s různými metodami hodnocení vlivu vysokotlakého vodíku na degradaci mechanických a křehkolomových vlastností konstrukčních materiálů, a to v podmínkách laboratorní MMV, která se v posledních letech dané problematice intenzivně věnuje.

Pro demonstraci aplikace zkušebních metod byl použit segment tlakové lahve z oceli 34CrMo4, na kterém bylo za účelem rozšíření souboru výsledků provedeno žíhání pěti různými režimy v rozsahu teplot 200 až 600 °C.

Obecně je možné využít dva odlišné přístupy, kdy je zkušební těleso buď syceno vodíkem po předem definované časové periodu a následně je zkouška prováděna na vzduchu dle standardizovaných metod, nebo probíhají zkoušky in-situ v prostředí vysokotlakého vodíku.

Vodíkování zkušebních těles typu Charpy nevedlo k výrazné degradaci materiálových vlastností, když v pouze jednom případě zkoušky materiálu žíhaného na 600 °C bylo pozorováno snížení křehkolomových vlastností při zkušební teplotě -100 °C. Podobně lze konstatovat, že i mechanické vlastnosti exponovaných zkušebních těles nevykazovaly významnější degradaci. Použití těchto metod je však limitováno nutností poměrně rychlé a přesné manipulace se zkušebními tělesy, aby bylo zamezeno oddifundování vodíku z materiálu.

Na základě víceletých zkušeností v oblasti zkoušení v prostředí vysokotlakého vodíku vykazují reprodukovatelnější výsledky zkoušky materiálů s počáteční únavovou trhlinou, a to jak statické, tak únavové. Bylo dokumentováno, že statická zkouška lomové houževnatosti in-situ v prostředí vysokotlakého vodíku vykazuje výrazně konzervativnější výsledky než expozice předzátížených zkušebních těles (metoda B vs. metoda C normy ČSN EN ISO 11114-4). Ačkoli jsou obě metody využívány pro zkoušky tlakových lahví, jsou založeny na rozdílném principu. Materiál se tak jeví mnohem náchylnější k šíření trhliny, případně křehkému lomu způsobenému vodíkovou křehkostí, je-li pomalu rozevírána ostrá trhlina, zatímco metoda C předpokládá zatížení na poměrně značnou hodnotu faktoru intenzity napětí již před začátkem expozice.

Cenné informace o chování materiálu s trhlinou v prostředí vysokotlakého při dynamickém zatížení poskytuje měření rychlosti šíření trhliny. Na studovaném materiálu 34CrMo4 byl pozorován na lomové ploše výskyt interkrystalického lomu, rovněž mocinná křivka Paris-Erdoganova vztahu byla posunuta směrem k vyšším rychlostem. S vyššími hodnotami rozkmitu faktoru intenzity napětí navíc dochází k nárůstu rychlosti růstu trhliny.

Další ambicí je možnost zapojení miniaturizovaných zkušebních těles do hodnocení odolnosti materiálu vůči vodíkovému zkrhnutí. Aplikace metody malých vzorků

(Small Punch Test), které se MMV intenzivně věnuje od 90. let 20. století se nabízí pro hodnocení svarových spojů, zejména v jejich úzkých tepelně ovlivněných oblastech. Používaná metoda sycení vodíkem s následným transportem vzorků do kapalného dusíku a vlastním provedením testu, se nezdá jako optimální a cílem pro další období bude vývoj metody pro SPT zkoušky in-situ v prostředí vysokotlakého vodíku.

Na základě dosažených výsledků a zkušeností MMV v oblasti zkoušení materiálu v prostředí vysokotlakého vodíku lze konstatovat, že mechanismus vodíkového zkrěhnutí se významněji projevuje na tělesech s ostrou trhlinou, v ideálním případě zatěžovaných in-situ v prostředí vodíku. Naopak tahové zkoušky, a to jak jejich provedení po vodíkové expozici, tak i in-situ v prostředí vysokotlakého vodíku, obvykle nevedly k očekávaným cílům a nebyla pozorována degradace materiálu vodíkovou křehkostí. Totéž bylo pozorováno i v případě zkoušky rázem v ohybu vodíkováných vzorků. Budoucí práce na MMV v oblasti zkoušek ve vysokotlakém vodíku tak budou cílit např. na tahové zkoušky na vzorcích s uměle vytvořeným ostrým vrubem a dosažením víceosé napjatosti, případně ověření změny křehkolomových vlastností zkouškou rázem v ohybu na tělesech s trhlinou, kdy je veškerá energie spotřebována na subkritický růst trhliny.

#### Poděkování

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

#### Literatura

- [1] ROBERTSON, I. M., SOFRONIS, P., NAGAO, A., MARTIN, M.L., WANG, S., GROSS, D.W. and NYGREN, K.E. Hydrogen Embrittlement Understood, *Metall. Mater. Trans. B* 46/3 (2015), 1085–1103.
- [2] DADFARNIA, M., NAGAO, A., WANG, S., MARTIN, M.L., SOMERDAY, B.P. and SOFRONIS, P. Recent advances on hydrogen embrittlement of structural materials, *Int. J. Fract.* 196/1-2 (2015), 223–243.
- [3] MICHLER, T., WACKERMANN, K. and SCHWEIZER, F. Review and Assessment of the Effect of Hydrogen Gas Pressure on the Embrittlement of Steels in Gaseous Hydrogen Environment, *Metals* 11/4 (2021) 637.
- [4] 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.
- [5] ASME BPVC. VIII.3-2021: *Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels*, 2021.
- [6] ČÍŽEK, P. and KANDER, L. Fracture Behavior of 34CrMo4 Steel In High-Pressure Hydrogen Environment. In *METAL 2020, 29<sup>th</sup> International Conference on Metallurgy and Materials*, 2020, s. 597-602.
- [7] PŘICHYSTAL, I. *Analýza bezešvých tlakových nádob na uskladnění vodíku – stanovení velikosti obvodového napětí ve válcové části*, Technická zpráva V3141/15. VITKOVICE-ÚAM, červenec 2015, Brno.
- [8] ČÍŽEK, P., KANDER, L. and KUBOŇ Z. Effect of high-pressure hydrogen environment on fatigue properties of 34CrMo4 steel. In *METAL 2019, 28<sup>th</sup> International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: TANGER, 2019.
- [9] PRIEST, A. H. *Fatigue crack growth and fracture resistance of steels in high-pressure hydrogen environment*. Report EUR 8191, Luxembourg, 1983, ISBN 92-825-3609-2.

## ArcelorMittal zastavuje výrobu koksu v Polsku, pozastavuje ocelárny v Bosně

ArcelorMittal pokračuje ve snižování výroby v Evropě a oznámil zastavení výroby ve svých závodech v Polsku a Bosně a Hercegovině, protože se snaží přizpůsobit slabé poptávce po oceli a ocelářských surovinách v regionu. Společnost ve svém prohlášení z 22. listopadu 2023 uvedla, že se rozhodla přizpůsobit výrobu koksu obtížným ekonomickým podmínkám ve své divizi ArcelorMittal Poland a připravuje uvedení koksařenské baterie v Krakově do pohotovostního režimu. Rozhodnutí je z velké části způsobeno nízkou poptávkou po koksu, která má podle odhadů společnosti klesnout o 36 %. Krakovská baterie však zajišťuje pouze malou část produkce koksu společnosti v Polsku. Většina jeho dodávek koksu pochází ze závodu ve Zdziessowicích, který nadále běží jako obvykle se všemi šesti bateriemi v provozu.

Slabé podmínky na trhu také donutily ArcelorMittal dočasně zastavit výrobu ve své ocelárně ArcelorMittal Zenica v Bosně s kapacitou 1 milion t/rok, potvrdil mluvčí pro S&P Global Commodity Insights 22. listopadu 2023. ArcelorMittal Zenica je vybavena jednou vysokou pecí a jedním kyslíkovým konvertorem, stejně jako dvěma válcovny na výrobu drátu a žebírkové oceli. Odstavila se nejen vysoká pec, ale i výroba v ostatních zařízeních se postupně zastavuje, válcovny jsou již také zastaveny. Neočekává se, že by bosenský závod obnovil normální výrobu, dokud se poptávka nezotaví na úroveň, která by podniku umožnila provozovat udržitelně.

ArcelorMittal neupřesnil, jaký podíl své instalované ocelářské kapacity v Evropě byl zastaven, ale potvrdil, že dočasně odstavil vysoké pece č. 2 a č. 3 ve svém závodě v Brémách v Německu a vysokou pec A ve svém závodě v belgickém Gentu. Rovněž uvedla, že plánuje uzavřít pec ve svém závodě Fos-sur-Mer ve Francii.

Zdroj: [spglobal.com](https://spglobal.com)