



Evropský program školení školitelů pro zásahové jednotky

Přednáška 4

Slučitelnost vodíku s různými materiály

ÚROVEŇ II

Velitel posádky

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro úroveň **Velitel posádky**.

Toto téma je k dispozici také na úrovních I, III a IV.

Tato přednáška je součástí balíčku školicích materiálů s materiály na úrovních I–IV: Hasič, velitel posádky, velitel zásahu a důstojník specialista. Viz úvod k přednášce týkající se kompetencí a očekávaných výsledků studia

Poznámka: tyto materiály jsou majetkem konsorcia HyResponder a měly by být podle toho uváděny, výstupy HyResponse byly použity coby základ



Upozornění

Navzdory pečlivosti, která byla věnována přípravě tohoto dokumentu, platí následující odmítnutí odpovědnosti: informace v tomto dokumentu jsou poskytovány, jak stojí a leží, a jejich autoři neposkytují jakoukoli záruku, že tyto informace jsou vhodné pro jakýkoli konkrétní účel. Uživatel využívá tyto informace na vlastní nebezpečí a odpovědnost.

Dokument vyjadřuje pouze názory autorů. Společný podnik pro palivové články a vodík a Evropská unie nenesou žádnou odpovědnost za případné použití informací uvedených v tomto dokumentu.

Poděkování

Projekt byl financován Společným podnikem pro palivové články a vodík 2 na základě grantové dohody č. 875089. Společný podnik získává podporu z programu Evropské unie pro výzkum a inovace Horizont 2020 a z Velké Británie, Francie, Rakouska, Belgie, Španělska, Německa, Itálie, Česka, Švýcarska a Norska.

Souhrn

Tato přednáška poskytuje informace o interakci vodíku s různými typy materiálů a i permeaci vodíku, které jsou mimořádně důležité pro technologie jeho skladování. Ačkoli vodík je nekorozivní plyn, reakce vodíku s některými kovy při vysoké teplotě může vytvářet korozivní hydridy, které pak vytvářejí v kovové mřížce plynové bubliny, tzv. puchýře. Při nízkých teplotách se některé kovy mohou stát křehčími v důsledku změny z tvárných na křehké. Tento proces se nazývá křehnutí chladem. Interakce vodíku s polymery může také vést k bobtnání, tvorbě puchýřů a poškození polymeru, což zvyšuje rychlost prostupu vodíku polymerní maticí. Rychlost prostupu vodíku kovovými nádobami (tj. typu I a II) nebo nádobami s kovovými vložkami (tj. typ III) je zanedbatelná. Rychlost prostupu vodíku zásobníky typu IV však musí být správně regulována na velmi nízkou hodnotu, aby koncentrace vodíku nedosáhla LFL vodíku ve vzduchu (4,0 % obj.).

Klíčová slova

Vodíková křehkost, kov, polymer, puchýře, vstup vodíku, zmírňování následků

Obsah

Souhrn.....	3
Klíčová slova	3
1. Cílové publikum	5
1.1 Popis úlohy: Velitel posádky.....	5
1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Velitel posádky	5
1.3 Předchozí učení: Velitel posádky	5
2. Úvod a cíle.....	5
3. Interakce vodíku s kovy.....	6
4. Interakce vodíku s polymerními materiály	9
5. Omezení prostupování vodíku	10
6. Nová norma pro slučitelnost vodíkových aplikací s polymerními materiály	12
Poděkování	13
Literatura a odkazy	13

1. Cílové publikum

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro úroveň Velitel posádky. Přednášky jsou k dispozici také na úrovních I, III a IV: Hasič, Velitel zásahu a Důstojník specialista.

Níže je uveden popis úlohy, úrovně odborné způsobilosti a očekávané znalosti na úrovni velitele posádky.

1.1 Popis úlohy: Velitel posádky

Velitelé posádek jsou zodpovědní za taktické nasazení hasičských týmů, které na základě konkrétních pokynů vycházejících ze SOP a informací získaných na místě zásahu zahajují a řídí činnost týmů, které plní stanovené úkoly zaměřené na dosažení požadovaných výsledků, jako jsou vyhledávání a záchrana osob, hašení a lokalizace požáru a vyprošťování.

1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Velitel posádky

Schopnost taktického rozhodování založená na znalostech, dovednostech a zkušenostech s chováním, které podporují úsudek při rozhodování za rychlého průběhu okolností. Na základě operačního učení a schopnosti interpretovat a v případě potřeby modifikovat SOP, využívat dříve nabyté informace a informace získané při incidentu se od velitele posádky očekává, že vytvoří a povede taktické operace poté, kdy vyhodnotí mimořádnou událost, určí priority a vyžádá si případnou další pomoc.

1.3 Předchozí učení: Velitel posádky

EQF 4 Faktické a teoretické znalosti v širokých souvislostech v rámci pracovního nebo studijního oboru. Řada kognitivních a praktických dovedností potřebných k řešení konkrétních problémů v oblasti práce nebo studia. Vykonávání samostatné činnosti v rámci pracovních nebo studijních podmínek, které jsou obvykle předvídatelné, ale mohou se měnit; dohlížení na běžnou práci ostatních a převzetí určité odpovědnosti za hodnocení a zkvalitňování pracovních nebo studijních činností.

2. Úvod a cíle

Téma interakce vodíku a jeho slučitelnosti s různými materiály je rozsáhlé. V této části přednášky se budeme zabývat dvěma různými aspekty: interakcí vodíku s kovovými a polymerními materiály, které se používají především na skladovací nádoby. Vzhledem k malé velikosti molekul a atomů vodíku může být vodík snadno absorbován různými materiály, včetně těch, které se používají k jeho skladování. To následně vede ke zhoršení mechanických vlastností materiálů, což může vést k nežádoucím únikům vodíku a narušení konstrukce.

Cílem přednášky je poskytnout členům zasahujících jednotek dostatečné znalosti pro přijímání vhodných rozhodnutí. Interakce vodíku s materiály se týká všech aplikací FCH. Materiály používané pro skladování jsou však kromě slučitelnosti s vodíkem často vystaveny vysokým tlakům, nízkým teplotám a cyklickému nebo statickému zatěžování. Dle toho je třeba materiály vybírat. Výběrem materiálů slučitelných s vodíkem se zabývají normy ISO platné pro

Přednáška 4: Slučitelnost vodíku s různými materiály

technologie FCH (podrobnější informace o příslušných RCS v přednášce „Zákony, předpisy a normy pro členy zásahových jednotek“ projektu HyResponse, http://www.hyresponse.eu/files/Lectures/RegulationCodesStandards_slides.pdf).

„Vodík má nízkou viskozitu a malé atomy, které mohou být absorbovány do materiálů. Tyto vlastnosti mohou způsobit únik vodíku a křehnutí některých materiálů, které mohou vést k narušení konstrukce skladovací nádoby“ [1]. Mechanická degradace konstrukčních materiálů vlivem vodíku je závažným problémem a způsobila mnoho havárií a nehod při výrobě, skladování, přepravě a používání vodíku [2]. Pro bezpečnost systémů skladování vodíku je zásadní správný výběr vhodných materiálů na jednotlivé komponenty. To se vztahuje na potrubí, stěny skladovacích nádob, plnicích přípojek, ventilů, armatur atd. Němý film natočený v 50. letech 20. století na univerzitě v Delftu ilustruje, jak v oceli v místech defektů a na dalších místech vznikají bubliny vodíku (<https://www.youtube.com/watch?v=bv9ApdzalHM>).

Na konci této přednášky budou členové zásahové jednotky schopni:

- vysvětlit mechanismy interakce vodíku s kovovými a polymerními materiály,
- stanovit vliv vodíkového křehnutí na bezpečnost systémů pro skladování vodíku,
- vymezit jev prostupování vodíku,
- uvést bezpečnou míru prostupování vodíku u vodíkových nádrží v osobních automobilech a autobusech.

3. Interakce vodíku s kovy

Slučitelnost vodíku s kovy je ovlivněna chemickými interakcemi a fyzikálními vlivy, mezi které se řadí:

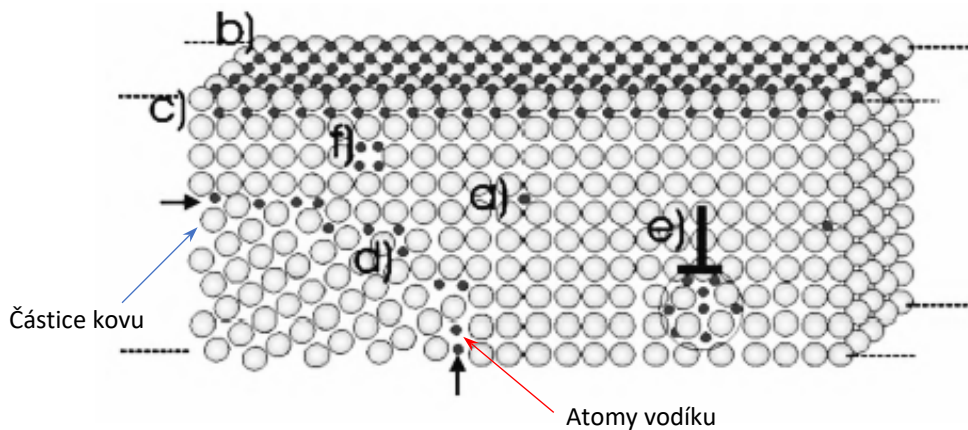
- Koroze: suchá koroze (při vysokých teplotách, *vodíkový atak*); mokrá koroze (nejčastější, způsobená vlhkostí); koroze způsobená nečistotami v plynu.
- Vodíková křehkost (HE).
- Křehnutí při nízkých teplotách („křehnutí chladem“).
- Prudké reakce (např. zapálení).

Suchá koroze je chemická reakce mezi suchým plynem a kovem, která může vést ke ztenčení stěny láhve [3]. Tento typ koroze není příliš častý, protože rychlost jejího postupu je při okolní teplotě velmi nízká. Při vysokých teplotách však může vodík reagovat s některými kovy a vytvářet například hydridy. Obecně může ve vodíkovém zásobníku po vstupu vody vznikat mokrá koroze. Upozorňujeme, že vodík je nekorodující plyn a ani zavlhka nemůže tento typ koroze způsobit. Při nízkých teplotách mohou některé kovy křehnout. Děje se tak změnou z tvárnosti na křehkost, je-li teplota nižší než teplota „nulové tvárnosti“, která je někdy výrazně vyšší než teplota kryogenu. To představuje problém pro zařízení vystavená pravidelným

Přednáška 4: Slučitelnost vodíku s různými materiály

teplotním cyklům. Několik nehod kryogenních skladovacích nádrží bylo způsobeno křehnutím zastudena.

Jevy vodíkové křehkosti (HE) a vodíkového ataku jsou podrobněji popsány níže. Křehnutí je proces, při kterém různé kovy, především vysokopevnostní oceli, po vystavení vodíku křehnou (tj. ztrácejí svou tvárnost/tažnost) a praskají [1]. Vzniká vniknutím molekulárního nebo atomárního vodíku do kovové mřížky. Dochází k němu při relativně nízkých teplotách (např. při teplotě okolí). K vodíkovému ataku dochází při vyšších teplotách, nad 200 °C. Přesný mechanismus vodíkového křehnutí není jasný. Předpokládá se několik mechanistických cest, jak je znázorněno na obrázku 1: (a) vznik roztoku vodíku v kovové mřížce; (b) adsorpce vodíku na povrchu a (c) na podkladové vrstvě kovu; (d, e, f) akumulace vodíku ve strukturálních defektech, jako jsou hranice zrn a dislokace vakancí. Vodík může v kovové mřížce rovněž vytvářet sloučeniny, jako jsou hydridy kovů nebo metan [4].



Zdroj: Kirchheim a Pundt (2014) [4]

Obrázek 1. Předpokládané cesty vstupu vodíku do kovu a defektů v něm.

Vysokopevnostní oceli jsou na vodíkové křehnutí nejcitlivější. Mezi příčiny vodíkového křehnutí se řadí:

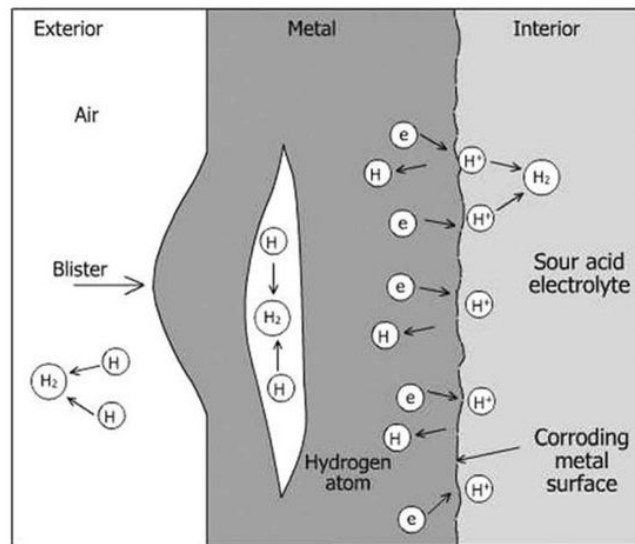
- Některé postupy při výrobě oceli, jako jsou svařování, elektrolytické pokovování, moření atd.
- Vodík vznikající jako vedlejší produkt mokré koroze kovu.
- Povrchové úpravy kovů (např. katodová ochrana kovu proti korozi).
- Adsorpce na povrchu kovu.

Vodíkové křehnutí se dělí do následujících kategorií [5]:

- Křehnutí v důsledku působení okolních vlivů – nastává, když je materiál vystaven vodíkové atmosféře, např. ve skladovacích nádržích.

Přednáška 4: Slučitelnost vodíku s různými materiály

- Interní reverzibilní křehnutí – vzniká při vstupu vodíku do kovu během jeho zpracování. Tento typ křehnutí může vést ke konstrukčnímu selhání materiálu, který nikdy předtím nebyl vystaven vodíku.
- Křehnutí reakcí s vodíkem – nastává při vyšších teplotách, kdy vodík chemicky reaguje se složkou kovu a vytváří nový mikrostrukturní prvek nebo fázi, jako například hydrid, nebo vytváří plynové bubliny, známé také jako *puchýře* (viz obrázek 2).



Obrázek 2. Tvorba puchýřů způsobená křehnutím v důsledku reakce vodíku

Úroveň procesu HE ovlivňuje celá řada faktorů [5]:

- Materiál:
 - Mikrostruktura
 - Chemické složení
 - Tepelné zpracování a mechanické vlastnosti
 - Svařování
 - Zpracování zastudena (deformační zpevnění)
 - Inkluze nekovových prvků
- Prostředí:
 - Čistota vodíku
 - Parciální tlak vodíku
 - Teplota
 - Napětí a deformace
 - Doba expozice

Přednáška 4: Slučitelnost vodíku s různými materiály

- Konstrukce a povrchové podmínky:
 - Úroveň pnutí
 - Koncentrace pnutí
 - Povrchové vady

4. Interakce vodíku s polymerními materiály

Jak již bylo zmíněno, polymerní materiály se stále častěji používají na vložky a obaly nádob na skladování vodíku. Na obaly kompozitních nádrží (typy III a IV) lze použít skleněná, aramidová nebo uhlíková vlákna [3]. Tato vlákna vynikají modulem pružnosti v tahu, pevností v tahu a elongací [3]. Polymery jsou v některých palivových člancích použity také jako materiál na membrány. Přečtěte si prosím o havárii, ke které došlo na PEM FC [7]. Dva jevy, které jsou často spojeny s polymerními materiály používanými v aplikacích FCH: *pronikání* vodíku skrz materiály a *degradace mechanických vlastností* polymerů. Skladování vodíku je z hlediska použitých materiálů značně problematické. Materiály používané pro skladování vodíku musí být lehké, ale zároveň by měly být schopné odolávat extrémně vysokým tlakům a zachovat si svoji integritu. Vodík působí na polymerní materiály několika nežádoucími vlivy:

- (1) *Bobtnání* polymerů, ke kterému dochází v důsledku absorpce/adsorpce plynu (nebo kapaliny).

Výsledkem může být nepříjemné zvětšení rozměrů součástí (zejména u O-kroužků) nebo ke vzniku puklin spojených s náhlým odplyněním při snížení částečného tlaku [8]. Významná úroveň bobtnání může být zastřena „vyluhováním“ změkčovadel a plnidel, která se často používají v polymerních materiálech. Je třeba vzít v úvahu i další důležité vlivy, jako jsou změny mechanické pevnosti a tvrdosti polymeru. Podle norem je bobtnání větší než 15 % v běžných provozních podmínkách označeno jako „NR“ (z angl. „Not Recommended“, nedoporučuje se); bobtnání menší než tato hodnota je označeno jako „A“ (z angl. „Acceptable“, přijatelné), a to za předpokladu, že i ostatní rizika jsou přijatelná. Plynný vodík pod tlakem může vést k bobtnání některých polymerů používaných ve vložkách nádrží.

- (2) *Puchýře* polymerů, které vznikají při rozpouštění velkého množství vodíku.

V polymerním materiálu se může rozpouštět relativně velké množství vodíku, a působení vodíku na polymer tak může způsobit nejen bobtnání, ale také tvorbu *puchýřů*, podobně jako na obrázku 2.

- (3) *Znehodnocení* polymerů v důsledku *nečistot* ve vodíku.

Pokud plynný vodík obsahuje určitý druh *nečistot*, které nejsou slučitelné s polymerními materiály, mohou tyto nečistoty způsobit zhoršení mechanických vlastností, a nakonec i protržení některé součásti. Toto riziko je třeba zvážit v závislosti na zdroji vodíku.

- (4) *Nebezpečí požáru*.

Přednáška 4: Slučitelnost vodíku s různými materiály

Vodík je hořlavý plyn a polymerní materiály se v případě požáru poměrně snadno zapálí. V důsledku toho dochází k degradaci materiálů a k výraznému snížení mechanické pevnosti, což může nakonec vést k protržení. Nádrže typu III a IV nedokáží (zpravidla) odolat působení ohně déle než 6–12 minut. Proto jsou nádrže obvykle vybaveny zařízeními PRD, která jsou schopna vodík během této doby vypustit, což způsobuje dlouhý tryskový požár.

(5) *Prostupnost vodíku.*

Barthelemy [3] uvádí, že prostupnost vodíku polymerní vložkou je jedním z hlavních problémů vysokotlakých vodíkových nádob, společně s vodíkovým křehnutím materiálů.

Všeobecně platí:

- čím je hustota polymeru vyšší, tím více se snižuje prostupnost tímto materiálem,
- čím je krystalinita polymeru vyšší, tím více se snižuje prostupnost polymerem.

Prostupností vodíku se zabývá následující část této přednášky.

5. Omezení prostupování vodíku

Prostupování je jev vlastní všem plynům, které jsou ve styku s polymery, a je výsledkem rozpouštění a difuze plynného vodíku v matici polymerního materiálu. Vzhledem k malé velikosti jeho molekul se zvyšuje difuze vodíku, a tím i jeho prostupování [3].

Podle normy SAE J2578 (2009) lze prostupování vodíku v systémech CGH₂ definovat jako difúzi plynu stěnami nebo póry nádoby, potrubí nebo materiálu [9]. Je třeba poznamenat, že vodík v atomární formě prostupuje kovy, zatímco u polymerů dochází k prostupování vodíku v molekulární formě [10]. Současné zásobníky typu IV používají polymerní vložku, například z vysokohustotního polyethylenu, obvykle obalenou uhlíkovými vlákny uloženými v pryskyřičné matici. Mohou se používat i jiná vlákna, například skleněná nebo aramidová, ale většina automobilových systémů používá uhlíková vlákna. Tloušťka obalu kolem nádoby se liší v závislosti na rozložení pnutí. Nádoby typu III nebo IV se používají ve většině aplikací v automobilovém průmyslu.

Prostupování lze definovat jako dlouhodobé, pomalé uvolňování vodíku ze systému CGH₂. Řízení prostupování vodíku je již dlouho považováno za klíčový faktor při vývoji technologií pro jeho skladování [11]. Prostupování vodíku z palubních nádrží představuje bezpečnostní problém z hlediska uzavřených míst, protože vodík se může po určitou dobu hromadit a vytvářet hořlavou směs se vzduchem. V uzavřeném místě bez ventilace může v důsledku dlouhodobého prostupování vodíku vzrůst jeho koncentrace ve vzduchu na LFL 4 % obj. Pro odhad doby dosažení LFL lokálně, např. pod stropem garáže, nebo homogenně v celé garáži, je důležité vědět, jaké bude rozprostření vodíku v prostoru.

Tvorba hořlavé směsi je hlavním bezpečnostním problémem při používání systémů FCH ve vnitřních prostorách. Existují dvě bezpečnostní otázky: *Jak bezpečně je pronikání vodíku polymerní vložkou použitou v palubní nádrži a jak probíhá jeho rozptýlení v garáži? Je*

Přednáška 4: Slučitelnost vodíku s různými materiály

přirozená ventilace dostatečná k eliminaci potenciálního nebezpečí vzniku hořlavé směsi vodíku se vzduchem? Rozprostření prostupujícího vodíku v prostoru, jako je garáž, kdy je dosaženo LFL vodíku ve vzduchu (4 % obj.), je důležité pro stanovení *maximální přípustné rychlosti prostupu* pro vozidla FC vybavená palubními nádržemi cGH₂ [10].

Byla také provedena studie CFD s cílem prozkoumat rovnoměrnost rozptylu pronikajícího vodíku v prostoru podobném garáži [13]. Numerické simulace byly provedeny na základě originálního přístupu, kdy byl do rovnice zachování vodíku v kontrolním objemu okolo povrchové plochy nádrže zaveden člen zdroje vodíku. Pronikání bylo simulováno jako objemové uvolňování vodíku v tenké vrstvě kontrolních objemů kolem povrchu nádrže o ploše 1,87 m². Simulace CFD ukázaly zanedbatelnou stratifikaci vodíku. Ukázalo se, že maximální koncentrace vodíku v uzavřené místnosti je vždy na horním povrchu nádrže a nikdy nedosáhne 100 % obj. Analytická analýza i numerické simulace prokázaly, že příspěvek difuze a vztaku k odtahu vodíku z povrchu nádrže jsou shodné do 1 minuty od začátku procesu. Podmínky kvaziustáleného stavu v prostoru s přibližně lineární distribucí vodíku shora dolů se pro uvažované rychlosti prostupu dosáhne přibližně za 1 hodinu. Například maximální koncentrace vodíku v čase 133 min na horním povrchu nádrže byla $8,2 \times 10^{-3}$ obj. % (obrázek 3). Zjištěný rozdíl v koncentraci vodíku mezi stropem a podlahou je přibližně 3×10^{-3} obj. % a tento rozdíl se v čase zachovává. Obě hodnoty jsou výrazně nižší než LFL 4 % obj.



Obrázek 3. Snímek rozptylu prostupujícího vodíku v garážovém prostoru z odk. [13]

Hodnoty maximální přípustné míry prostupu pro osobní automobil a městský autobus jsou vypočteny a uvedeny v tabulce 1 s ohledem na následující skutečnosti:

- Rychlost prostupu se udává v Nml/hod/l vodního objemu.
- Prostupující vodík lze považovat za homogenně rozptýlený.
- Nejhorší věrohodná intenzita přirozené ventilace garáže v obytné budově činí 0,03 výměny vzduchu za hodinu (ACH).
- Nejvyšší dovolená koncentrace vodíku činí 1 % obj., tj. ¼ LFL.

Přednáška 4: Slučitelnost vodíku s různými materiály

- Nejvyšší dlouhodobá teplota materiálu je 55 °C.

Tabulka 1. Vypočtené bezpečné rychlosti prostupování vodíku

Minimální zkušební teplota (°C)	Nejvyšší přípustná rychlost prostupování (ml/hod/l)	
	Osobní automobil	Městský autobus
15	6,0	3,7
20	8,0	5,0

Při rychlosti prostupování uvedené v tabulce 1 by rozptýl vodíku v typické garáži nepředstavoval potíže. Tyto přípustné rychlosti prostupování upravuje evropské právo [12]. Jinde jsou pro rychlost prostupování vodíku přijímány různé limity. Porovnejte například následující úrovně:

- Japonský automobilový výzkumný ústav: **5 Nml/hod/l** (15 °C).
- Společnost automobilových inženýrů SAE J2579, konec životnosti, 55 °C: **150 Nml/min/vozidlo**.
- ISO/TS15869: 2009 na konci životnosti (20 °C): **75 Nml/min/nádobu**.

6. Nová norma pro slučitelnost vodíkových aplikací s polymerními materiály

V současné době chybí zkušební metody pro posouzení odolnosti konstrukce a vlastností polymerů ve vodíkových aplikacích. Slučitelnost polymerů by měla být na úrovni materiálu. Byla sestavena nová norma s názvem „CHMC 2 – Zkušební metody pro posuzování slučitelnosti materiálů v aplikacích se stlačeným vodíkem – polymery“. Normu vydala organizace ANSI / CSA (srpen 2019) [15]. Výsledky zkoušek mají poskytnout základní porovnání vlastností polymerních materiálů v aplikacích využívajících stlačený vodík. Norma předkládá seznam prioritních zkoušek. První z nich je prostupnost vodíku, kdy se zkouší, zda a do jaké míry je polymer schopen zadržet vodík v materiálu. Druhou zkouškou je fyzikální stabilita, která zjišťuje, nakolik je polymer schopen zachovat své rozměry (bobtnání nebo smršťování) a/nebo hmotnost. Třetí zkouška je rychlá cyklická zkouška, při níž se testuje degradace materiálu (extruze, pukliny nebo puchýře) v důsledku působení vodíku. Byly vybrány speciální zkoušky, které sledují změny vlastností polymeru a ověřují, zda si materiál dokáže zachovat mechanické vlastnosti z hlediska konstrukce a komprese. Zkouška je reologická. Pokud polymer není schopen zachovat těsnost rozhraní a konstrukci s krycím povrchem, dochází k dynamickému opotřebení třením. Poslední kritickou zkouškou je zkouška kontaminace materiálem, při níž se zkoumá uvolňování složek materiálu způsobující kontaminaci vodíku.

Poděkování

Projekt HyResponse je všeobecně uznáván, protože zde prezentované materiály staví na původní sérii přednášek HyResponse.

Literatura a odkazy

1. Úvod do problematiky vodíku pro stavební úřady, Ministerstvo energetiky USA, Washington DC. K dispozici na adrese: http://www.hydrogen.energy.gov/training/code_official_training/ [přístup k datu 06.11.2020].
2. Havárie H₂, Hlášení havárií H₂ a Poučení (databáze). K dispozici na adrese: <http://www.h2incidents.org/> [přístup k datu 06.11.2020].
3. Barthelemy, H (2011). Technologie skladování vodíku, slučitelnost materiálů s vodíkem. Výukové materiály Společné evropské letní školy pro palivové články a vodíkovou technologii. Srpen 2011, Viterbo, Itálie.
4. Kirchheim R, Pundt A (2014). 25 – Vodík v kovech. Fyzikální metalurgie (páté vydání): 2597–2705.
5. Barthelemy, H (2006). Slučitelnost kovových materiálů s vodíkem. Výukové materiály 1. evropské letní školy o bezpečnosti vodíku, 15.–24. srpna 2006.
6. ISO/TR 15916 (2004). Základní hlediska bezpečnosti vodíkových systémů. Mezinárodní organizace pro normalizaci. Technická komise ISO 197, Vodíkové technologie. Mezinárodní organizace pro normalizaci, Ženeva.
7. Husar, A, Serra, M, Kunusch, C. (2007). Popis selhání těsnění v 7čláňkovém zásobníku PEMFC. Časopis o energetických zdrojích Journal of Power Sources, svazek 169, s. 85–91.
8. Mafeld, A. (2015). CPV: Regionální trendy na světovém trhu. JEC Asia: Fórum o kompozitních tlakových nádobách. Singapur, 22. října 2015.
9. SAE J2579 (2009). Technická informační zpráva o palivových systémech pro vozidla s palivovými články a jiná vozidla na vodík, SAE International, Detroit, Michigan, USA, leden 2009.
10. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering (Základy bezpečnostního vodíkového inženýrství), části I a II. K dispozici na adrese: www.bookboon.com, e-kniha k bezplatnému stažení.
11. Mitlitsky, F, Weisberg, AH a Blake, M (2000). Skladování vodíku v dopravních prostředcích pomocí lehkých nádrží. Národní laboratoř Lawrence Livermore. Sborník příspěvků ze symposia Vodík DOE 2000 v USA, NREL/CP-570e28890, USA.

Přednáška 4: Slučitelnost vodíku s různými materiály

12. Nařízení Komise (EU) č. 406/2010 ze dne 26. dubna 2010, kterým se provádí nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 79/2009 o schvalování typu vozidel na vodíkový pohon. Úřední věstník Evropské unie. Svazek 53, 18. května 2010. K dispozici na adrese: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:122:FULL:EN:PDF> [přístup k datu 06.11.2020].
13. Saffers, JB, Makarov, DV a Molkov, VV (2011). Modelování a numerická simulace prostupování a šíření vodíku v garáži s adiabatickými stěnami a nehybným vzduchem. Mezinárodní časopis o energii získávané z vodíku International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 36(3), s. 2582–2588.
14. Adams, P, Bengaouer, A, Cariteau, B, Molkov, V a Venetsanos, AG (2011). Přípustná míra prostupování vodíku ze silničních vozidel. Mezinárodní časopis o energii získávané z vodíku International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 36, s. 2742–2749.
15. CSA/ANSI CHMC 2, 1. vydání, srpen 2019 – Zkušební metody pro posuzování slučitelnosti materiálů v aplikacích se stlačeným vodíkem – polymery.