



BEZPEČNOSTNÉ ASPEKTY SKLADOVANIA VODÍKA V AUTOMOBILE POHÁŇANOM PALIVOVÝMI ČLÁNKAMI

Marcel KURACINA - Maroš SOLDÁN - Jozef FIALA

SAFETY ASPECTS OF HYDROGEN STORAGE IN FUEL CELL POWERED VEHICLES

ABSTRAKT

Cieľom príspevku je predstavenie využívania technológie palivových článkov ako alternatívneho zdroja energie pre pohon automobilov a charakterizovanie úrovne bezpečnosti skladovania vodíka v automobile poháňanom palivovými článkami. V posledných rokoch sa ľudstvo čoraz viac snaží využívať alternatívne palivá v sektore dopravy kvôli rastúcemu znečisteniu našej planéty a mŕňaniu zásob fosílnych palív vo svete. Existuje niekoľko typov alternatívnych palív, avšak mnohé z nich nie sú plnohodnotnou náhradou za fosílnu palivá. Vhodnou náhradou sa javí byť vodík, ktorý môže byť využitý pri studenom spaľovaní v palivových článkoch. Takto vzniká elektrická energia, ktorá následne poháňa elektromotor. Nevýhodami tohto typu pohonu je však skutočnosť, že vodík je nebezpečný plyn a preto si jeho skladovanie a využívanie vyžaduje mnohé bezpečnostné opatrenia. V príspevku sú popísané jednotlivé riziká vyplývajúce zo skladovania vodíka v tlakových nádržiach, kryogénnych nádržiach a v metalhydridoch.

Kľúčové slová: vodík, automobil, palivové články, bezpečnosť, alternatívne palivá, skladovanie vodíka

ABSTRACT

The aim of the contribution is to introduce the fuel cell technology as an alternative energy source for vehicles and to characterize the level of safety of hydrogen storage in fuel cell powered vehicles. In recent years, the humanity tries to use and develop alternative fuels in sector of transportation more than ever before because of increasing the pollution of our planet and exploitation of fossil fuel resources in the world. There are several types of alternative fuels in the world but not each of them can be considered as a full-value substitution for fossil fuels. Hydrogen can be considered as a suitable substitution when it is used in cold combustion process in fuel cells. In this type of combustion, the electricity is generated and subsequently, the electric motor is powered by the electricity. The main disadvantage of this type of propulsion is the fact, that hydrogen is dangerous gas thus storing and using of hydrogen requires a lot of safety proceedings. Various risks resulting from storing of hydrogen in pressure tanks, cryogenic tanks and metal hydrides are described in the contribution.

Key words: hydrogen, vehicle, fuel cells, safety, alternative fuels, hydrogen storing

ÚVOD

Cieľom práce je predstaviť technológiu palivových článkov, ktoré sa vo svete už niekoľko rokov využívajú na pohon automobilov. Technológia je verejnosti stále prístupná len vo forme predvádzacích vozidiel, prototypov a konceptov. Jej masové využitie zatiaľ bráni viacero faktorov. Ide predovšetkým o cenu tejto technológie, cenu výroby vodíka, problémy s distribúciou vodíka a s jeho skladovaním. Všetky uvedené nedostatky sa však dajú eliminovať a tak by sa v blízkej budúcnosti mohla stať táto technológia vhodnou alternatívou ku klasickým spaľovacím motorom na báze fosílnych palív. Palivový článok potrebuje na svoj chod vodík a kyslík, ktoré sú oddelene privádzané na anódu a katódu palivového článku. Tu sa mení ich chemická energia na energiu elektrickú a jediným produktom po ich energetickom využití je voda, resp. vodná para. Ak sú do palivového článku neustále dodávané reakčné látky, môže tento vyrábať elektrickú energiu prakticky neustále. To vyžaduje prítomnosť zásobníka s vodíkom vo vozidle. V súčasnosti existujú tri základné spôsoby skladovania vodíka. Ide o tlakové nádrže na plyný vodík, kryogénne nádrže na kvapalnú vodík a metalhydridy, v ktorých je vodík viazaný chemicky. Každý z uvedených spôsobov skladovania vodíka si vyžaduje rôzne bezpečnostné opatrenia, nakoľko vodík je plyn s radou nebezpečných vlastností. Cieľom príspevku je poukázať na skutočnosť, že koncepcia pohonu pre automobily založená na technológii palivových článkov využívajúcich vodík je rovnako bezpečná a v niektorých oblastiach dokonca bezpečnejšia ako v súčasnosti masovo používané palivá na fosílnom základe.

STAVBA A PRINCÍP PALIVOVÉHO ČLÁNKU

Princíp elektrochemického palivového článku objavil v roku 1839 waleský fyzik Sir William Grove, ktorému sa ako prvému podarilo vyrobiť z vodíka a kyslíka jednosmerný prúd pri pokuse o obrátenie procesu elektrolyzy. V dôsledku nepochopenia významu vynálezu padla téma do zabudnutia a až začiatkom šesťdesiatych rokov 20. storočia bol palivový článok objavený znovu v súvislosti s rozvojom kozmonautiky. Kozmické lode potrebovali ľahšiu náhradu za ťažké batérie, preto boli do vesmírnych lodí Skylab a Apollo zabudované palivové články, ktoré zásobovali palubné prístroje elektrinou a posádku pitnou vodou [1].

Palivové články patria medzi zariadenia, v ktorých na základe elektrochemických procesov dochádza k priamej premene vnútornej energie paliva na elektrickú energiu. Na základe tejto definície sú veľmi podobné primárnym, či sekundárnym článkom (batérie). Sú tu však niektoré zásadné rozdiely. Prvým je ten, že aktívne chemické látky nie sú v prípade palivových článkov súčasťou katódy a anódy, ale sú k nim priebežne privádzané zvonka. Obe elektródy pôsobia

výlučne ako katalyzátor chemických premien, v priebehu činnosti článku sa takmer neopotrebovávajú a nemení sa ani ich chemické zloženie. Rovnako u palivových článkov neexistuje pojem „kapacita článku“, pretože tento môže pracovať bez časového obmedzenia, ak sú mu neustále privádzané aktívne látky. Ďalším rozdielom spočíva v tom, že pracovná teplota väčšiny palivových článkov je vyššia ako u batérií [2].

Na zápornú elektródu, ktorú nazývame palivová anóda, sa privádza aktívna látka-palivo. Tá tu oxiduje, jej atómy sa zbavia jedného alebo niekoľkých elektrónov z valenčnej sféry a uvoľnené elektróny, ktoré predstavujú elektrický prúd, sa vonkajším obvodom pohybujú ku kladnej katóde. Na kladnej elektróde, kam sa privádza oksylichodadlo, naopak prebieha redukcia. Atómy oksylichodadla voľné elektróny prijímajú, za súčasnej reakcie s kladnými iónmi, ktoré k nej prenikajú elektrolytom. Ak sa vonkajší okruh so záťažou preruší, prebiehajúce chemické reakcie sa z dôvodu nedostatku elektrónov zastavia. V palivovom článku je chemická energia menená na elektrickú energiu, bez termického expanzného procesu. Ide o tzv. studené spaľovanie.

Medzi oboma elektródami sa nachádza elektrolyt buď zo špeciálnej polymérovej fólie, alebo tuhých látok ako napríklad kyslík (H_2SO_4 , H_3PO_4), alebo alkalický (KOH) roztok. Úlohou elektrolytu je okrem iného brániť priamemu kontaktu oboch plynov. Elektrolyt je elektrický izolátor, ktorý zabezpečuje výmenu elektrónov iba cez vonkajší okruh. Tak vzniká rozdiel elektrického napätia medzi oboma elektródami, ktoré je v prípade palivového článku vodík-kyslík asi 1,23 V [3].

VODÍK A JEHO VLASTNOSTI

Vodík je najrozšírenejší prvok vo vesmíre a tretí najrozšírenejší prvok na Zemi. Asi 15,4 % atómov zemskej kôry a oceánov tvorí vodík viazaný v zlúčeninách. Ak však vyjadříme výskyt vodíka v hmotnostných percentách (0,9 hmotn. %), radí sa tento prvok na deviate miesto [4]. V súčasnosti sa vo svete ročne vyrobí asi $450 \cdot 10^9$ m³ vodíka, ktorý sa využíva hlavne v chemickom priemysle na výrobu amoniaku, v petrochemickom priemysle pri rafinácii ropy a v metalurgickom priemysle pri výrobe a rafinácii kovov. Čiastočne sa využíva na výrobu metanolu a len malá časť sa využíva ako palivo napr. v raketových motoroch alebo v palivových článkoch.

Dôvody, pre ktoré bol vodík vybraný ako ekologické palivo budúcnosti je možné zhrnúť do nasledovných bodov :

- prakticky nevyčerpatelná surovinná základňa (voda),
- možnosť všestranného využitia v energetike, doprave, metalurgii a chemickom priemysle,
- na jeho výrobu je potrebné použiť energiu, ktorú pri jeho energetickom využití s určitou účinnosťou znovu získame,
- produktom pri energetickom využívaní vodíka je ekologicky nezávadná voda alebo vodná para [5].

Pri štandardných podmienkach je vodík bezfarebný plyn bez chuti a zápachu, ktorý na vzduchu horí jasnomodrým veľmi horúcim plameňom. Je 14,28 krát ľahší ako vzduch a má 7 krát lepšiu tepelnú vodivosť ako vzduch. Vo vode sa rozpúšťa málo, 22 ml plynného vodíka v 1 litri vody pri 0 °C a tlaku 101 325 Pa. Lepšie sa rozpúšťa v paládiu, platine a nikle [5]. Vodík má 4 krát väčšiu difúziu ako zemný plyn a 12 krát väčšiu ako pary benzínu. Vztlak má zhruba 50 krát väčší ako benzínové výpary, čo znamená, že pri úniku sa veľmi rýchlo rozšíri do okolia a nevzniká nebezpečenstvo jeho hromadenia [6]. Aj napriek tomu však existuje riziko vznietenia alebo výbuchu vodíka pri jeho úniku v miestach s nedostatočným vetraním ako sú tunely, garáže, prípadne interiér automobilu [7]. Aj však platí, že sa vodík dokáže oveľa rýchlejšie rozptýliť do okolia a tým znížiť pravdepodobnosť explózie. Pri jeho horení nevznikajú žiadne sadze ani dym, ktoré môžeme vidieť pri horení iných palív a do okolia sa šíri len jedna desatina tepla radiáciou v porovnaní s horením benzínu alebo zemného plynu. Vodík tvorí so vzduchom horľavú zmes v širokom pásme objemových koncentrácií od 4 % do 75 %. Pary benzínu vytvárajú horľavú zmes v rozmedzí 1,4 % až 7,4 % obj. Aby teda došlo k vytvoreniu horľavej zmesi, musí byť vo vzduchu prítomné 3 krát väčšie množstvo vodíka ako benzínových pár.

Negatívom je naopak až 14 krát nižšia zápalová energia vodíka v porovnaní s benzínom (0,017 mJ proti 0,25 mJ). Táto nevýhoda je však diskutabilná, nakoľko k zapáleniu zemného plynu stačí aj iskra zo statického náboja. Ak už však nastane zapálenie vodíka, je oveľa vyššia pravdepodobnosť, že vodík vyhorí ako vybuchne, pretože má oveľa nižší limit horľavosti ako limit detonačný. Dokonca aj v prípade, keby došlo k výbuchu vodíka, jeho explozívna energia na jednotku objemu je 22 krát nižšia než energia benzínových pár. Na rozdiel od benzínu je vodík netoxický, a ani pri horení neohrozuje životné prostredie, naopak produkty horenia benzínu a iných bežných palív sú toxické. V prípade incidentu pri preprave, pri ktorom dôjde k úniku prepravovaného nosiča energie, sa vodík veľmi rýchlo rozptýli na rozdiel od benzínu, ktorý môže ohrozoť spodné vody pri vsakovaní do zeme a navyše, pri nahromadení pár v vetraných priestoroch drenážneho systému môže nastať požiar alebo výbuch [6].

SKLADOVANIE VODÍKA V AUTOMOBILE

Vývoj bezpečného, cenovo dostupného a energeticky efektívneho spôsobu uskladnenia vodíka je kľúčový pre budúcnosť vodíkových technológií a palivových článkov [8]. Na prevádzku palivového článku môže byť vodík vo vozidle uskladnený v čistom stave ako prvok, alebo vo viazanej forme (napr. metanol) [2]. Zásobovanie palivového článku čistým vodíkom je však zložitejšie. Ten môže byť vo vozidle uskladnený ako stlačený plyn, ako kvapalina v kryogénnych nádržiach, prípadne v metalhydridových nádržiach, v ktorých je chemicky viazaný [3]. Ďalšie metódy uskladnenia vodíka sa ešte nachádzajú v štádiu výskumu. Dnes sa však ešte nedá presne predvídať, ktorá technológia sa v budúcnosti presadí na trhu [2].

TLAKOVÉ NÁDRŽE

Stlačenie plynného vodíka pod vysokým tlakom je dnes najviac využívaný spôsob a súčasne je realizovaný s najmenšími nákladmi. Nádrže je možné plniť a transportovať pri normálnej teplote okolia a pre tlakové nádoby, ventily a väčšinu ďalších komponentov platia prakticky rovnaké podmienky ako pri skladovaní zemného plynu a technických plynov [2]. Rovnako sa stlačením plynného vodíka dosiahne zvýšenie jeho energetickej hustoty [9].

Väčšina používaných tlakových nádrží má hrubú stenu z ocele alebo hliníku. Takáto konštrukcia je síce robustná a dokáže znášať vysoké tlaky, ale jej hlavnou nevýhodou je neprimerane vysoká hmotnosť. Moderné tlakové nádrže majú vnútornú vrstvu z kovu, väčšinou z hliníku. Tá je pomocou sklenených alebo uhlíkových vlákien vystužená. Obal (oplašťovanie) pokrýva len valcovú časť. Koncová časť nádrže zostáva nezosilnená. Pre použitie vo vozidlách s palivovými článkami je však vhodnejší typ, ktorý má celý vonkajší plášť pokrytý uhlíkovými vláknami. Ďalší typ nádrží nemá vnútornú stenu z kovu, ale z kompozitu. Nevýhodou tejto konštrukcie je však skutočnosť, že vodík má veľmi malú hustotu a z vnútornej nádrže môže difundovať. Tieto straty môžeme síce obmedziť, ak nádobu prekryjeme tenkou vrstvou kovu, to však opäť zvýši náklady na výrobu. Tlakovými nádržami sú už vo svete vybavené milióny vozidiel na zemný plyn a tieto preukazujú dobrú úroveň bezpečnosti. Konštrukcia takýchto nádrží vydrží viac než dvojnásobok bežného pracovného tlaku a štruktúra uhlíkových vlákien sa ani pri trvalom zaťažení nemení [2]. Dôležitou skutočnosťou je nutnosť uzemniť vozidlo pri tankovaní na čerpacej stanici, aby sa zamedzilo vzniku statického náboja. [10]

Pri nárazovom teste vozidiel so vstavanými tlakovými nádržami nehrozí nebezpečenstvo ani pri kolízii s pevnou prekážkou pri rýchlosti 80 km.h^{-1} . Nádrže sa síce zdeformovali, avšak vnútorný tlak neunikol [1]. Niektoré nové typy kompozitných tlakových zásobníkov sú dokonca schopné vydržať bez akéhokoľvek poškodenia aj v prípade totálnej deštrukcie automobilu. Pri nárazovej skúške, v ktorej bol automobil spustený z výšky 30 m, čo predstavuje náraz zhruba pri rýchlosti 90 km.h^{-1} , nedošlo ani k najmenšiemu poškodeniu týchto zásobníkov [6]. V skúške nádrže na priestrel síce vznikol otvor, ale nedošlo k explózii. Otvor sa počas testu nezväčšil a unikajúci plyn sa rýchlo rozptýlil do okolia [3]. V prípade požiaru vozidla, alebo pri iných udalostiach, v ktorých môže požiar iného vozidla alebo objektu pohltiť tlakovú nádrž sa aktivuje zariadenie na kontrolovanú výpusť tlaku (zhruba pri teplote $102 \text{ }^\circ\text{C}$). V prípade aktivácie tohto zariadenia je vodík postupne z nádrže vypúšťaný v takom množstve, ktoré negatívne neohrozí bezpečnosť [11]. V neposlednom rade, všetky automobily s palivovými článkami majú opatrenia, ktoré pri kolízii automaticky vypnú elektrický prúd a uzavrú všetky cesty pre vodík [6]. Tlaková nádrž na plynný vodík je na obrázku č. 1.



Obr. 1 - Kompozitová tlaková nádrž na vodík od spoločnosti Lincoln Composites [12].

KRYOGÉNNE NÁDRŽE

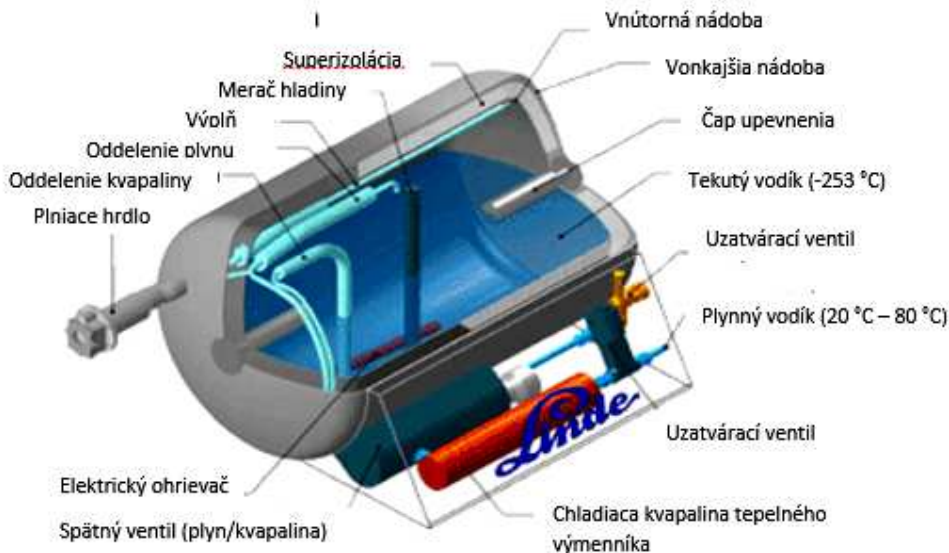
Uskladňovanie a preprava vodíka v kvapalnom stave sa stalo aktuálnym vďaka jeho využívaniu v raketovej technike v kozmických programoch. Skvapalnením vodíka sa zvyšuje jeho energetický obsah na jednotku objemu, no na druhej strane na skvapalnenie vodíka je potrebné vynaložiť energiu, ktorá sa teoreticky rovná $3,9 \text{ MJ.kg}^{-1}$ respektíve $3,3 \text{ kWh.kg}^{-1}$ [5]. V prospech využívania tekutého vodíka argumentuje aj jeho hustota, ktorá je pri teplote nádrže približne 20 K ($-253 \text{ }^\circ\text{C}$) $70,8 \text{ kg.m}^{-3}$, čo je trikrát viac než hustota plynného vodíka. Ak sa však vodík ochladzuje ďalej, až ku svojmu trojnemu bodu asi pri teplote 14 K ($-259 \text{ }^\circ\text{C}$), stúpa jeho hustota ešte o 15 % až 20 %. V tomto stave vzniká v tekutom vodíku pevná vodíková látka [3]. Táto technika sa v súčasnosti ešte nachádza vo vývojovom štádiu [2]. Nádrže na tekutý vodík dokážu uskladniť viac vodíka v danom objeme ako tlakové nádrže na stlačený vodík. Objemová kapacita kvapalného vodíka je $0,070 \text{ kg.dm}^{-3}$ v porovnaní s objemovou kapacitou plynného vodíka na úrovni $0,030 \text{ kg.dm}^{-3}$ pre 70 MPa tlakovú nádrž [13].

Vnútorná vrstva nádrže tekutého vodíka je z ocele alebo hliníka a je pokrytá asi 5 cm hrubou tepelnou izoláciou. Táto konštrukcia sa nachádza vo vnútri valcového priestoru z ocele alebo hliníka a je z oboch strán uzavretá. Vnútorná nádoba je s vonkajšou spojená tepelne nevodivými spojmi. Žiarenie je odtienené tenkou hliníkovou alebo plastovou fóliou pokrytou hliníkom, zlatom alebo iným silne reflektívnym materiálom. Výplňou je hodváb alebo nylon, ktoré sú tiež zlým vodičom tepla. Okrem toho je priestor medzi oboma stenami vákuovaný, čím sa zabráni vedeniu tepla z vnútornej nádoby. V podstate dochádza k ohrevu kvapalného vodíka iba cez upevňovacie komponenty a plniace hrdlá [3]. Pri prípadnom úniku vodíka do priestoru medzi nádobami je tento ohriaty vykurovaním a odvedený ako plyn [2].

Nádrže na tekutý vodík sú menej stabilné než tlakové nádrže a pri nehode môžu byť problematické [3]. Veľmi nízka teplota skladovaného vodíka predstavuje pre človeka vážne zdravotné riziko. Pri kontakte s pokožkou môžu vzniknúť kryogénne popáleniny a omrzliny. Pri vdýchnutí studených pár môže rovnako dôjsť k vážnemu poškodeniu pľúc. Nebezpečné môžu byť aj vysoko podchladené kovové časti palivového systému. Pri manipulácii s týmito časťami systému je dôležité používať ochranné rukavice [8]. Ak unikne veľké množstvo kvapalného vodíka, môže byť dokonca skvapalnený

kyslík zo vzduchu a pri reakcii tekutého kyslíka s inak veľmi stabilným asfaltom môže nastať vznietenie kyslíkovo-vodíkovej zmesi [3].

Určitý technický problém nastáva napríklad pri dlhodobom parkovaní, pri ktorom sa vodík neustále odparuje, čo si vyžaduje ďalšie prídavné bezpečnostné opatrenia. Výrobca nádrží LINDE uvádza, že počas 14 dní z nádrže neunikne ani atóm vodíka a sľubuje ďalšie zlepšenie [2]. Nádrž na tekutý vodík LINDE je na obrázku č. 2.



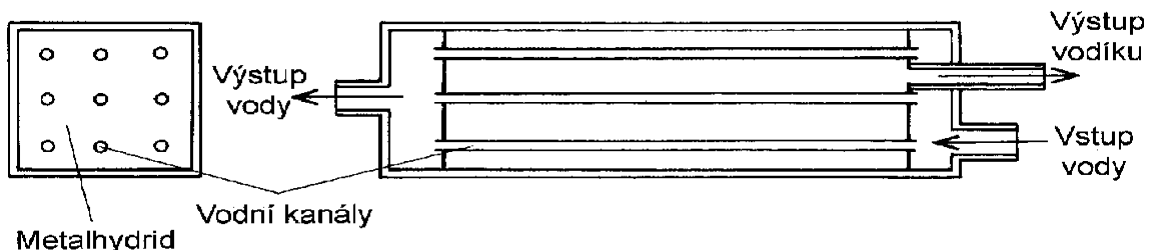
Obr. 14 Nádrž na tekutý vodík LINDE [22]

Obr. 2 - Kryogénna nádrž na kvapalný vodík od spoločnosti LINDE [9].

METALHYDRIDOVÉ ZÁSOBNÍKY

Pri využívaní vodíka v automobilovom priemysle sa hľadajú spôsoby ako vodík skladovať čo najbezpečnejšie. Medzi takéto spôsoby uskladňovania vodíka patrí viazanie vodíka vo forme hydridov kovov [5]. Niektoré kovy a kovové zliatiny môžu vytvoriť hydridy a poňať tak veľké množstvá vodíka. Tieto kovy absorbujú vodík pri nízkych teplotách a môžu ho opäť vydať bez toho, aby sa ohriali. Ako materiál pre metalhydridové nádrže je väčšinou použité magnéziu alebo zliatiny dvoch alebo troch nasledujúcich prvkov: titán, vanád, chróm, magnéziu, železo, kobalt, nikel, zirkón, lantán a paládium. Tieto hydridy sa veľmi dobre hodia ako zásobníky vodíka. Ani pri tisíc násobnom použití sa nekontaminujú cudzími atómami [2].

Viazanie vodíka je exotermický proces, a tak pri plnení zásobníka je potrebné kovovú náplň chladiť a opačne, pri uvoľňovaní vodíka je potrebné náplň ohrievať, pretože sa jedná o endotermický proces [5]. Metalhydridový zásobník teda musí byť vybavený výkonným chladiacim systémom, čo je v automobiloch nutné predovšetkým pre rýchle natankovanie [3]. Dôvodom je dĺžka doby tankovania, ktorá je po presiahnutí 5 minút pre užívateľov automobilov väčšinou neakceptovateľná [2]. Na obrázku č. 3 je znázornené chladenie metalhydridového zásobníka.



Obr. 3 - Chladenie metalhydridovej nádrže [2].

Pre praktické použitie je vodík podchladený. Pre odvádzanie plynného vodíka je nutný ohrievací systém. Ten môže byť napojený na odpadové teplo palivového článku, alebo ak je ho v článku polymér-elektrolyt málo, získa sa teplo spálením vodíka. Ak je toto teplo využité pomocou prídavného horáka, celková účinnosť palivového článku poklesne [1].



Každá zo zliatin používaných na viazanie vodíka má určité výhody a nevýhody, čo ich predurčuje na rôzne využitie. Železo-titánové zliatiny sú lacné, majú nízku teplotu tvorby hydridov a nízku teplotu uvoľňovania vodíka, ale sú ťažké a nehodia sa pre mobilné zariadenia. Zliatiny na báze horčíka sú síce ľahšie ako železotitánové zliatiny, ale teplota tvorby hydridov a tak aj teplota uvoľňovania vodíka je vyššia, a tak sa až 30 % uskladneného vodíka musí využiť na jeho uvoľnenie z hydridov. Pre mobilné zariadenia sú najvhodnejšie zliatiny zo vzácnych zemín, ktoré sú ľahké a majú podobné vlastnosti ako železotitánové zliatiny, avšak sú veľmi drahé [5].

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Z analýzy výsledkov práce sa dá konštatovať, že bezpečnosť automobilov s pohonom na palivové články je veľmi dôležitou oblasťou, ktorá dokáže zákazníka buď odradiť alebo presvedčiť o kúpe vozidla, a preto sa na bezpečnosť tejto technológie kladie veľký dôraz aplikovaním prísnych bezpečnostných predpisov a noriem už v etape návrhu a následne i v etape konštrukcie a výroby jednotlivých komponentov.

Pri porovnaní chemických, toxikologických a požiaro-technických vlastností vodíka a bežných fosílnych palív môžeme za bezpečnejšie palivo považovať vodík. V neprospech vodíka v porovnaní s benzínom hovorí jeho nižšia iniciačná energia a vyššia horná hranica výbušnosti. Avšak vo všetkých ostatných parametroch, ako napríklad tepelný tok pri horení, vztlak pár, dolná hranica výbušnosti, toxicita splodín horenia, dymovosť, tvorba sadzí, explozívna energia na jednotku objemu a vysoký detonačný limit sa dá vodík považovať za bezpečnejšie palivo pre pohon automobilu. O týchto skutočnostiach svedčia aj požiarne skúšky vykonané na University of Miami a v Japonskom automobilovom výskumnom inštitúte JARI, kde zo záverov skúšok bolo možné tvrdiť, že vozidlá obsahujúce tlakovú nádrž s plynným vodíkom dosiahli pri požiarnej skúške rovnakú, alebo dokonca lepšiu úroveň bezpečnosti ako vozidlá s konvenčnou nádržou obsahujúcou benzín. Vodík pri požiarnej skúške unikol cez dieru v plášti tlakovej nádrže, ktorá bola na účely testu umelo vytvorená a tento bol následne umelou iniciáciou vznietený. Plameň po chvíli vyhorel, pretože vodík horí čisto a rýchlo a následkom nízkeho tepelného toku vodíkového plameňa bol exteriér vozidla prakticky nedotknutý a nepoškodený a v interiéri vozidla boli zaznamenané len nepatrne zvýšené teploty, čo má veľký význam z hľadiska ochrany posádky pri požiari. Najvyššia teplota v interiéri tohto vozidla bola len 19,44 °C a najvyššia teplota exteriéru vozidla, nameraná na zadnom skle, bola 44 °C. Pri horení vodíka sa totiž do okolia šíri len jedna desatina tepla v porovnaní s horením benzínu a preto sú väčšinou ľudia zranení vodíkovým plameňom len ľudia, ktorí s ním prišli do priameho kontaktu.

Zaujímavosťou vozidiel s technológiou palivových článkov je ich veľmi nízka hlučnosť pri nízkych rýchlostiach, ktorá môže paradoxne zvýšiť riziko nehody. Časť účastníkov cestnej premávky sa totiž môže riadiť akustickými signálmi namiesto optických. Predovšetkým ide o chodcov a cyklistov, ktorí môžu vstúpiť na cestu, prípadne prechádzať do iného jazdného pruhu v domnienke, že sa v okolí nenachádza žiadne vozidlo. Tento problém je v súčasnosti experimentálne riešený reproduktormi zabudovanými v prednej časti vozidla, ktoré vytvárajú ilúziu zvuku benzínového, prípadne naftového spaľovacieho motoru. Ďalším faktorom, ktorý môže prispieť k zvýšeniu bezpečnosti posádky vozidla, prípadne cestnej premávky je skutočnosť, že vozidlá s palivovými článkami obsahujú až desaťkrát menej pohyblivých komponentov, čím sa zvyšuje ich spoľahlivosť a znižuje riziko poškodenia alebo poruchy vozidla [14].

ZÁVER

Častokrát sa pri alternatívnych palivách môžeme stretnúť s neochotou ľudí prejsť od klasických typov pohonu v automobile k alternatívnym typom pohonu. Táto neochota pramení či už v nezaujme ľudí o nové, čistejšie technológie, alebo v nevedomosti, nedostatočnej informovanosti alebo v obavách o bezpečnosť týchto technológií. Práve bezpečnosť tejto technológie je dôležitým faktorom, ktorý môže ľudí rozdeliť na fanúšikov a odporcov tejto technológie a preto musí byť zvládnutá na najvyššej možnej dosiahnuteľnej úrovni. Riziká a nebezpečenstvá vyplývajúce z využívania technológie palivových článkov vyplývajú najmä z vodíka, ktorý je využívaný ako palivo. Vodík sa vo vozidle môže nachádzať v rôznych skupenstvách a podobách, ktoré závisia od spôsobu jeho uskladnenia. Najčastejšie sa s vodíkom vo vozidle môžeme stretnúť v plynnej podobe, v stlačenej podobe, vo vysokotlakových nádržiach, alebo v kvapalnom stave v kryogénnych nádržiach, prípadne vo viazanom stave v metalhydridoch, pričom každá z verzii disponuje rizikami pre ňu charakteristickými. Všetky spôsoby uskladnenia vodíka boli preto podrobené rozličným kolíznym a mechanickým skúškam, ktorých úlohou bolo zhodnotiť a posúdiť úroveň bezpečnosti, ochrany posádky, prípadne dopadov na bezprostredné okolie pri rôznych okolnostiach, ktoré sa môžu v cestnej premávke vyskytnúť. Z výsledkov uvedených skúšok vyplýva, že automobily obsahujúce zásobníky na vodík sú vo všetkých oblastiach rovnako bezpečné a v niektorých dokonca bezpečnejšie z hľadiska ochrany posádky a vplyvov na okolie ako konvenčné automobily obsahujúce klasickú nádrž na benzín, prípadne naftu.

ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- [1] GREENPROJEKT. *Vodíkové palivové články*. [online]. [cit. 2013-12-09; 13:01 SEČ]. Dostupné na internete: <<http://www.greenprojekt.sk/vodikovepc.html>>
- [2] KAMEŠ, Josef. *Alternatívni pohony automobilů*. Praha: 2004. 232 s. ISBN 80-7300-127-6
- [3] FERENČEY, Viktor. *Dynamika motorových vozidiel*. Bratislava: STU, 2008. 181 s. ISBN 978-80-89313-09-9
- [4] EARNSHOW, A. GREENWOOD, N.N. *Chemie prvků*. Praha: 1993. 793 s. ISBN 80-85427-38-9
- [5] KLENOVČANOVÁ, A., IMRIŠ, I. *Zdroje a premeny energie*. Košice: TU, 2006. 492 s. ISBN 80-89040-29-2



- [6] ČESKÝ, Antonín et al. Palivové články. Česká energetická agentúra: 2003. 104 s.
- [7] BULTEL, Y., AUROUSSEAU, M., OZIL, P., PERRIN, L. *Risk analysis on a fuel cell in electric vehicle using the MADS/MOSAR methodology*. Trans IChemE: 2007. 10 s.
- [8] DLOUHÝ, P., JANÍK, L. Skladování vodíku I. [online]. [cit. 2013-12-09; 13:05]. Dostupné na internete: <<http://www.hytep.cz/?loc=article&id=8>>
- [9] Gaseous and Liquid Hydrogen Storage. [online]. [cit. 2013-12-09; 12:48]. Dostupné na internete: <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/hydrogen_storage.html>
- [10] TS AUTOSERVER. Honda FCX Clarity. [online]. [cit. 2013-12-09; 12:58]. Dostupné na internete: <<http://auto.server.sk/automobily.asp?id=35783>>
- [11] High-Pressure Hydrogen Tank Testing. [online]. [cit. 2013-12-09; 13:10]. Dostupné na internete: <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/hydrogen_storage_testing.html>
- [12] *Hydrogen Fuel Tank Overview*. [online]. [cit. 2013-12-09; 14:38]. Dostupné na internete: <<http://lincolncomposites.com/products/tuffshell-hydrogen-fuel-tanks/>>
- [13] Hydrogen storage. [online]. [cit. 2013-12-09; 13:49]. Dostupné na internete: <http://www.eoearth.org/article/Hydrogen_storage>
- [14] KURACINA Marcel. 2011. *Vodíkové palivové články*. Bakalárska práca. MTF STU, Trnava

ADRESY AUTOROV:

Ing. Marcel KURACINA, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Ústav bezpečnosti, environmentu a kvality, Botanická 49, 917 24 Trnava, Slovenská republika, marcel.kuracina@stuba.sk

prof. Ing. Maroš SOLDÁN, PhD. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Ústav bezpečnosti, environmentu a kvality, Botanická 49, 917 24 Trnava, Slovenská republika, maros.soldan@stuba.sk

Ing. Jozef FIALA, PhD. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Ústav bezpečnosti, environmentu a kvality, Botanická 49, 917 24 Trnava, Slovenská republika, jozef.fiala@stuba.sk

RECENZIA TEXTOV V ZBORNÍKU

Recenzované dvomi recenzentmi, členmi vedeckej rady konferencie. Za textovú a jazykovú úpravu príspevku zodpovedajú autori.

REVIEW TEXT IN THE CONFERENCE PROCEEDINGS

Contributions published in proceedings were reviewed by two members of scientific committee of the conference. For text editing and linguistic contribution corresponding authors.