

Hidrogén, mint alternatív hajtóanyag, a hidrogéntárolás problémája és egy lehetséges megoldás

Vehovszky Balázs PhD hallgató*

**BME Közlekedésmérnöki Kar, Járműgyártás és -javítás Tanszék
H-1111 Budapest, Bertalan Lajos u. 2. Z608. vehovszky@kgtt.bme.hu*

Abstract: A mobil gépek hajtására jelenleg szinte kizárólagosan használt fosszilis tüzelőanyagok a jövőben egyre inkább háttérbe fognak szorulni, helyet adva új, környezetbarát és megújuló energiaforrásoknak. Az egyik lehetséges alternatív hajtóanyag a hidrogén, mely nagy energiatartalmával, nulla emissziós felhasználhatóságával és szinte korlátlan mennyiségben történő előállíthatóságával hívta fel magára a figyelmet. Jelen cikk a hidrogén alkalmazásának egyik legfőbb problémájával: a biztonságos a hidrogéntárolással foglalkozik, valamint egy lehetséges alternatíva: az abszorpciós tárolás lehetőségeit, korlátait vizsgálja.

1. BEVEZETÉS

Napjaink társadalmá egyre inkább függővé válik az energiától: az ipari termelésben ugyan úgy, mint otthonainkban vagy éppen a közlekedésben – el sem tudnánk képzelni az életet állandó energiaellátás nélkül. Bár hatalmas mennyiségben fogyasztja az emberiség az energiát, a jelen és a közeljövő technikai fejlődése szinte korlátlan energiaforrások kiaknázását teszi lehetővé – gondoljunk csak a napenergiára, az atomenergiára vagy a fúziós energiára – csak hogy nem mindig ott és olyan formában, ahol és amilyenben szükség lenne rá. Ez a probléma már évszázadokkal ezelőtt felmerült, akkor az üzemeken belül mechanikai úton továbbították a mozgási energiát a munkahelyekhez. A XIX. században a villamos energia felfedezésével új távlatok nyíltak az energiatovábbításban: ahová villamos vezetékkel lehetett vezetni, oda az energia is eljutott. Így váltották fel például a gőzgépeket az elektromos motorok.

Ekkorra már a közlekedési igény is annyira megnőtt, hogy a közlekedés lett a fejlődés egyik hajtómotorja: a maximum egy tucat utast befogadó lóvasutat felváltotta az akár 50 embert szállító villamos, a zajos és lomha gőzmozdonyokat az erős, jó hatásfokú villanymozdonyok. Ezeket a járműveket tömegek juthattak el bárhova – ahol volt elektromos hálózat.

1886-ban Karl Benz bemutatta az első, belsőégésű motorral hajtott járművet, ami új távlatokat nyitott: mivel az üzemanyagot magunkkal is tudják vinni, a mobil gépek már nem voltak az elektromos hálózathoz kötve.

A XX. század végéig ez a két energiaforrás – az elektromos áram és a fosszilis energiaforrások – versenye jelentette a fejlődést a közlekedésben használt hajtásmódok területén. Előbbi jó hatásfokával, míg utóbbi korlátlan mobilitásával tartotta magát versenyben. Ennek megfelelően az elektromos hajtású járművek a – kötött pályás – közösségi közlekedésben terjedtek el, míg a belsőégésű motoros járművek az egyéni közlekedés kizárólagos eszközei lettek.

Az ezredforduló közeledtével azonban két felismerés is beárnyékolta a fosszilis energiaforrások addig elért hatalmas népszerűségét: egyrészt az alapanyaguk, vagyis a kőolaj (és földgáz) korlátos volta, másrészt az addigra egyértelműen globális problémává érett környezet-szennyezés: a sok millió év alatt a légkörből megkötött hatalmas mennyiségű szén-dioxid egy jelentős része ugyanis – a kőolajszármazékok elégetésével – évtizedek alatt visszakerült a légkörbe. Sőt, ezen felül – a magas hőmérsékletű, tökéletesen égés következtében – egyéb szennyező anyagok (nitrogén-oxidok, korom részecskék, szénmonoxid stb.) is nagy mennyiségben keletkeznek. Akármilyen jó hatásfokkal égetjük is el a fosszilis energiaforrásokat, fizikai-kémiai korlátok szabnak gátat annak, hogy „tisztá energiaforrássá” válhassanak. (Legfeljebb egyes mérnöki megoldásokkal csökkenthetjük az elégetésükből származó káros anyagok mennyiségét – pl. katalizátor, részecskeszűrő, add-blú adalék stb.)

A fosszilis üzemanyagok azonban számtalan jó tulajdonsággal rendelkeznek – mint például a nagy fajlagos energia, energiasűrűség (tömegegységben/térfogat egységben lévő energia), millió tonna/év mennyiségben előállítható, megfelelő biztonsággal szállítható, tárolható, felhasználható – melyek elérése egy környezetbarát anyaggal igen nagy feladat elé állítja korunk kutatóit-mérnökeit.

2. HIDROGÉN, MINT ENERGIAHORDOZÓ ANYAG

A fenti követelményeknek megfelelő anyagok közül talán az egyik legígéretesebb a hidrogén, mely kiváló tüzelőanyag: egyrészt rendkívül nagy égéshője és fűtőértéke miatt (2. Táblázat), másrészt – amivel teljesen megfelel a fenntarthatóság igényeinek – égése abszolút környezetbarát, a keletkező égéstermék tiszta víz. Ha a hidrogént a Földön szinte korlátlanul rendelkezésre álló tengervízből állítjuk elő – ami bár nagy energiaigénnyel jár, de mint fentebb említettem a technika fejlődésével ez egyre kevésbé jelent problémát – akkor a természetre nézve egy teljesen „tisztá” körforgással tudjuk fedezni mindennapi „mobil energia” igényünket.

1. Táblázat: a hidrogén főbb fizikai - kémiai tulajdonságai [1]

Tulajdonság	Érték	Halmazállapot, környezet
Olvadáspont	- 259,1 °C	-
Forráspont	- 252,7 °C	-
Sűrűség	0,08989 kg/m ³	gáz, 0 °C, 0,1 MPa
Sűrűség	70,8 kg/m ³	folyadék, -253 °C
Sűrűség	76 kg/m ³	szilárd, - 262 °C
Égési hőmérséklet	2600 °C	gáz
Fajhő C _p	14,40 kJ/kg K	0-200 °C, 0,1 MPa
c _v	10,29 kJ/kg K	0-200 °C, 0,1 MPa
Móltömeg	1,00797 g/Mol	-
Elektronszerkezet	1 s ¹	-

2.1. Üzemanyagcella vagy belső égésű motor

A hidrogén energiaforrásként való felhasználása során két alapelv jöhet szóba: belső égésű motorban való elégetés, vagy üzemanyagcellában való felhasználás. (A hidrogént, mint üzemanyagot felhasználó tüzelőanyag-cellát szokás üzemanyagcellának nevezni.)

A belső égésű motorban való felhasználást könnyíti, hogy ez a technológia mára nagyon kiforrott technológia. Bizonyos műszaki változtatásokra mindenképp szükség lenne, de az optimális működés érdekében már számos problémával szembesült és oldotta meg azokat az emberiség az elmúlt században.

2. Táblázat: a hidrogén és a fosszilis tüzelőanyagok belsőégésű motorban való felhasználásának tulajdonságai [1]

	Hidrogén	Benzin	Gázolaj
Égéshő [MJ/kg]	141,97	45,217	44,715
Fűtőérték [MJ/kg]	119,62	42,035	41,843
Égéstermék *	H ₂ O	H ₂ O, CO ₂ (CO)	H ₂ O, CO ₂ (CO)

(*) A táblázatban szereplő égéstermék tökéletes égésre értendő, elméleti megfontolás alapján. Belsőégésű motorok esetében a valóságban a levegő nitrogénjéből keletkeznek még nitrogén-oxidok (NO_x) valamint a tökéletlen égés következtében dízel járművek esetében jelentős mértékű korom.

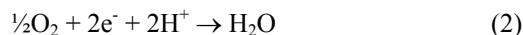
Az üzemanyagcella elve: a hidrogén égés reakcióját (2H₂ + O₂ → 2H₂O) két részreakcióra bontja, amelyek egymástól elkülönítve játszódnak le.

Az első folyamat során a hidrogén protonokra és elektronokra bomlik katalizátor (platina) hatására:



Ezután a protonok és az elektronok külön úton jutnak el az oxigénhez (a protonok elektroliton vagy membránon

keresztül, míg az elektronok a cellára kapcsolt külső áramkörön folynak végig), ahol vízzé egyesülnek:



Végeredményben tehát szintén vizet kapunk, de nem az égésből származó térfogatnövekedésből nyerjük az energiát, hanem közvetlenül az égésben résztvevő elektronokból. Normál égés során ezek az elektronok csupán két közeli atom között mozognak, üzemanyagcella esetében ezekből az elektronokból álló elektromos áramot engedjük át valamekkora potenciálkülönbségen az oxigénhez, így nyerünk munkát. (A tüzelőanyag-cella tulajdonképpen egy Galvánelem, aminek az elektródáit (hidrogént és oxigént) folyamatosan adagoljuk – innen származik a szintén használatos tüzelőanyag-elem elnevezés)

Mivel ugyan arról a reakcióról van szó mind üzemanyagcellában való felhasználás, mind belsőégésű motorban való elégetés esetén, az elvileg kinyerhető munka ugyan akkora (a hidrogén égéshője), azonban belsőégésű motor esetén az energia-átalakítás határfoka termodinamikailag korlátozott, a mai belsőégésű motorok esetében jellemzően 30 % körül van. Hidrogén üzemanyaggal el lehet érni a mai legjobb hatásfokú turbódízel motorok 40 % -os hatásfokát [2].

Üzemanyagcella esetében a hatásfok függ a cella típusától, üzemi körülményeitől, de legtöbb esetben eléri a 60 % -ot.

A mai gépjármű-motoroknál egy nem kívánatos veszteség a kipufogógázok hőenergiája. Ez a veszteség üzemanyagcella esetében is jelen van (forró vízgőz), aminek visszanyerésével tovább javíthatjuk a hatásfokot (akár 80 % fölé).

A 3. Táblázat bemutatja az üzemanyagcellák főbb típusait és azok fontosabb tulajdonságait.

Az üzemanyagcellás hajtáslánc hatásfokát a villanymotor hatásfoka rontja (modern villanymotorokkal 95 % fölötti hatásfokot el lehet érni [4]), míg belsőégésű motorok esetében a bonyolultabb hajtáslánc miatti nagyobb veszteséget kell figyelembe venni.

Az üzemanyagcella további előnye, hogy elektromos energiát nyerhetünk belőle, amellyel – a belső égésű motoroknál sokkal kedvezőbb paraméterekkel rendelkező – villanymotort hajthatunk meg. (Kisebb helyigény, kedvezőbb nyomaték-fordulatszám karakterisztika, jobb hatásfok, nincs szükség váltóra, fékezéskor energiát táplálhatunk vissza stb.)

Bár az üzemanyagcella elve már több mint 100 éves, de ez idáig sokkal kevésbé kutatott-fejlesztett terület, mint a belsőégésű motoroké, így még jelentős fejlesztések várhatók ezen a téren. Sajnos az üzemanyagcellák ára ma még nem versenyképes – egy autó hajtására használható cella ára megegyezik egy komplett, belsőégésű motorral szerelt autó árával.

3. Táblázat: Különböző típusú üzemanyagcellák jellemzői [3]

Tüzelőanyag-cella (Fuel Cell)	PEMFC (Proton Exchange Membrane FC)	AFC (Alkaline FC)	PAFC (Phosphoric Acid FC)	MCFC (Molten Carbonate FC)	SOFC (Solid Oxide FC)
Hőmérséklet [°C]	25 – 100	23 – 250	160 – 220	650 – 660	800 – 1000
Hatásfok [%]	50 – 60	50 – 60	37 – 55, (72 – 80 hőhasznosítással)	45 – 60, (70 – 85 hőhasznosítással)	45 – 65, (70 – 85 hőhasznosítással)
Teljesítmény [kW]	0,01 – 250 (cellánként)	2,2	25 – 250 (cellánként)	250 – 1000	200 (cellánként) 300 – 3000 (modulonként)
Elektrolit	polimer membrán	35-50%-os KOH oldat	tömény foszforsav	folyékony karbonát	szilárd, tömör kerámia
Teljesítmény-sűrűség [mW/cm ²]	500 – 1000	250 – 400	200 – 300	150 – 300	200 – 400
Élettartam [óra]	10 000 – 100 000	3000 – 10 000	30 000 – 40 000	10 000 – 40 000	8000 – 40 000
Költség [\$/kW]	200 – 2000	1000	200 – 3000	1250	1500
Felhasználás	közlekedés, erőmű	ürrepülés,	közlekedés	kogenerációs erőmű	kogenerációs erőmű
Megjegyzés	gyors, nagy energiasűrűségű	fejlesztés alatt, egyéb célokra		korrozív elektrolit	max. 10 MW-ig

3. HIDROGÉNTÁROLÁS

A leendő talán legnagyobb hidrogén-fogyasztó a közlekedés lehet. Ebben az ágazatban ugyanis rendkívüli előnyt jelent mind a hidrogén nagy fűtőértéke, mind pedig az, hogy nem kell gondoskodni a végtermék tisztításáról, tárolásáról.

Az „ideális” energiatároló anyaggal szemben megfogalmazott követelmények közül a hidrogénnel kapcsolatban az egyik legnagyobb hiányosság mind a mai napig a nagy mennyiségben való biztonságos szállítás, tárolás.

A mai autók hatásfoka több ponton jelentősen javítható, a jövő hidrogénhajtású autója kevesebb energiával is beéri majd. Az ebben szerepet játszó fontosabb tényezők:

- ✓ Az üzemanyagcellás felhasználás jó hatásfoka
- ✓ Az elektromos hajtásrendszer egyszerűbb és könnyebb, mint a mai autók hajtáslánc
- ✓ A fékezési energia egyszerű visszanyerése az elektromos hajtás révén
- ✓ A korszerű kompozit anyagok alkalmazásával a jövő karosszériája jóval könnyebb lehet
- ✓ Az informatika rohamos fejlődése révén az aktív balesetmegelőzés egyre hatékonyabbá válik, a passzív védelem (robosztus, erős karosszéria), és ezzel együtt az autók súlya jelentősen redukálódhat.

Ezeket figyelembe véve a mai autók átlagos 600 km-es hatótávolságát (két üzemanyagöltés között megtehető utat) alapul véve egy hidrogénhajtású autó üzemanyag-kapacitása ~ 4 kg hidrogén/feltöltés kell legyen.

A napjainkban elterjedt tárolási módok (nagy nyomáson palackban vagy alacsony hőmérsékleten cseppfolyós

állapotban) nagy körülményt igényelnek, ezek hétköznapi alkalmazása még kiforratlan, sőt ilyen mennyiségű hidrogén tárolása jelentős tömeg- és térfogat-többlettel járna.

3.1. A hidrogén tárolásának fő nehézségei

Hidrogén tárolásánál két fő problémával kell szembenézni:

Egyrészt a hidrogén gáz sűrűsége atmoszférikus nyomáson 1/14-e a levegőének és körülbelül 1/8000-e a benzinének! Vagyis, bár tömegre vetítve a benzinnel képest közel háromszorosa a fűtőértéke, ez az érték térfogatra vetítve 1 bar nyomáson kb. 1/2500! Egy hagyományos, 50 literes hidrogénpalackban 100 bar nyomáson, szobahőmérsékleten mindössze 0,45 kg hidrogén van! Megfelelő biztonsággal elkészíthető 250 bar-os tartály esetében kb. 200 literes üzemanyagtank lenne szükséges, ami az ezzel járó súlytöbblettel együtt meglehetősen kompromisszumos megoldást jelentene. Folyékony tárolás esetében elegendő lenne nettó 60 liter tárolókapacitás, itt viszont az igen alacsony hőmérséklet előállításához van szükség jelentős plusz energia-, tömeg- és berendezés-ráfordításokra.

Másrészt a hidrogén igen gyúlékony és robbanásveszélyes: a levegővel keveredve nagy koncentráció-tartományban (4,1-74 térfogat százalék) a legkisebb szikra hatására – már 580°C-os gyulladási hőmérsékleten – berobban. (Tiszta oxigénnel keverve 6 tf % - 95 tf % H₂ esetén robban az oxigén-hidrogén keverék.)

A közlekedésben különösen nagy figyelmet kell fordítani a biztonságra, hogy egy esetleges baleset következtében ne kerülhessen túl sok hidrogén a levegőbe, azonban a

jelenlegi tárolási technikákkal ez a megkívánt biztonsági szint csak jelentős kompromisszumok árán lenne elérhető.

Összefoglalva: a hidrogén rendkívül jó üzemanyag lenne, azonban jelentős veszteségekkel és kompromisszumokkal jár, ha a jármű üzemanyagtankjában elemi – gáz vagy folyadék – állapotban van.

4. HIDROGÉN-ABSZORPCIÓ, MINT HIDROGÉNTÁROLÁSI MÓD

Egy ígéretes megoldás a hidrogén elnyelése valamilyen anyagban (az elnyelés történhet gáz közegből vagy elektrokémiai úton). Ennek legfőbb pozitívuma a biztonság – a tárolóból csak lassan szabadul fel a hidrogén-gáz, így elkerülhető a robbanásveszély – míg a tárolóanyagból származó súlytöbblet jelenti a legfőbb negatívumot. A tároló térfogatigényét tekintve rendkívül kedvező a helyzet: meglepő módon számos abszorbens anyagban a hidrogén térfogati sűrűsége (g/cm³) tízszer nagyobb, mint egy 100 bar nyomású hidrogénpalackban, sőt nagyobb, mint a cseppfolyós hidrogénben!

Az elnyelés, mint megoldás nem újkeletű: Az igen jó égési tulajdonságokkal rendelkező, de rendkívül robbanásveszélyes acetilént is acetonban elnyelve tárolják, amit kovafölddel – vagy manapság porózus műanyaggal – töltött tartályban tartanak. Bár ott az elnyelés csupán fizikai értelemben történik, az alapelv ugyan az: ne legyen egy kritikus mennyiségnél több veszélyes anyag egyszerre egy térfogatban.

Mint láthatjuk, az abszorpciós tárolásnak sok több oldala van, azonban sok fizikai korlátja is. Jelenleg még egyetlen

abszorbens anyag sem rendelkezik elég jó tárolási tulajdonságokkal ahhoz, hogy belőle gazdaságosan készíthető legyen olyan tároló, melynek energiasűrűsége felveszi a versenyt a jelenleg használt fosszilis energiahordozókkal.

Összefoglalva egy ideális hidrogéntároló anyaggal szemben támasztott követelményeket [1]:

- Nagy fajlagos hidrogén befogadó képesség (kg/kg, kg/dm³)
- A hidrogénfelvétel legyen a lehető legnagyobb mértékben reverzibilis, az anyag képes legyen leadni a tárolt hidrogén jelentős részét
- Mind a hidrogénfelvétel, mind a leadás gyors folyamat legyen, de ne robbanásszerű láncreakció. A tartály sérülése esetén se szabadulhasson fel veszélyes mennyiségű hidrogén.
- Hosszú élettartam: az anyagnak nem szabad jelentősen roncsolódnia, szennyeződnie a feltöltés-kiürítési ciklusok során. Bírjon ki legalább 1000 ciklust
- A hidrogén tipikus szennyezőivel szemben legyen ellenálló. Ne csökkenjen jelentősen hidrogén tároló képessége, ha ipari tisztaságú hidrogénnel töltjük fel.
- Kicsi legyen a sűrűsége
- Ne legyen mérgező
- Legyen olcsó, nagy mennyiségben előállítható
- Elhasználódás után legyen a lehető legnagyobb mértékben újrahasznosítható

4. táblázat: Elemek hidridjei, kötési energiájuk és kötésük jellege [1]

Ionos		Fémes										Kovalens				
LiH -176																
NaH -117		MgH ₂ -75										(AlH ₃) _x				
KH -117	CaH ₂ -176		ScH ₂ -201	TiH ₂ -126	VH (-59)	CrH (-17)	MnH (-17)	FeH (+34)	CoH (+34)	NiH (+17)	CuH 21		GaH ₃	GeH ₄	AsH ₃	
RbH -109	SrH ₂ -188		YH ₂ -226	ZrH ₂ -163	NbH (-75)	MoH (+17)	TcH (+50)	RuH (+67)	RhH (+38)	PdH -38			InH ₃	SnH ₄	SbH ₃	TeH ₂
CsH -100	BaH ₂ -176		LaH ₂ -209	HfH ₂ -134	TaH ₂ (-59)	WH (+42)	ReH (+92)	OsH (+84)	IrH (+67)	PtH (+17)			(TlH ₃)	PbH ₄	BiH ₃	(PoH ₂)
	(Re)H ₃		PrH ₂ -209	NdH ₂ -209		SmH ₂ -222		GdH ₂ -201				ErH ₂ -226				

() jelzi, hogy az adott hidrid képződéshője, összetétele vagy előállíthatósága nem egyértelmű

4.1. Hidrogén oldódása fémekben

Az elemi gázok közül – kis mérete miatt – a hidrogén oldódik leginkább a fémekben és ötvözeteikben.

Az abszorbens fém elektronegativitásától függően az oldott hidrogén viselkedhet atomosan, pozitív vagy negatív ionként is. Ennek megfelelően az alkáli fémekben Me+H⁻ formában, sószerű hidridként van jelen, az átmeneti fémekkel fémes hidrideket képez (itt protonként van jelen),

a III-VI. főcsoport elemeivel pedig kovalens kötésű hidrideket alkot [1].

A fémek hidrogén-elnyelési folyamata a következő lépésekből áll:

1. A H₂ molekulák adszorpciója a felületen
2. A H₂ molekulák disszociációja a felületen
3. A H atomok behatolása a felületi rétegekbe

4. A H atomok diffúziója a felületi rétegeken keresztül, majd az anyag belsejében
5. Esetleges szerkezeti változások az anyagban [5]

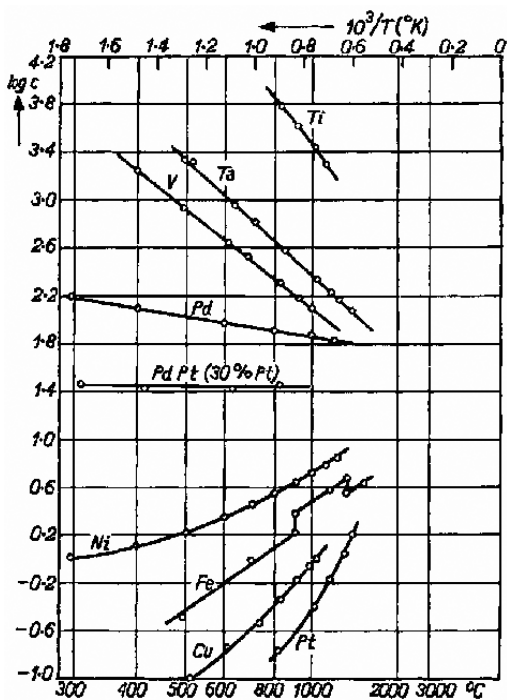
A hidrogénoldódás két fontos jellemzője az egyensúlyi hidrogéntartalom és a hidrogénoldódás (ill. felszabadulás) sebessége. Előbbi adott külső körülmények (P_{H_2} , T) között tetszőlegesen hosszú idő alatt a fémbe kialakuló hidrogéntartalmat jelenti. Ez jellemezhető tömegszázalékkal vagy a H/M arányszámmal (amely egységnyi tároló anyagban a hidrogén atomok és a tároló fématomok számának arányát adja meg), és elsősorban az abszorbens anyag összetételétől függ.

A hidrogénoldódás sebessége a hidrogénmentes állapotból adott külső körülmények mellett a telítés-közel állapot (pl. 99 %-os telítettség) eléréséig eltelt időt jelenti. A hidrogénoldódás sebességét befolyásolja a hidrogénatomok adhéziója (megkötődése) a felületen, átjutási sebességük a felületi rétegen, diffúziójuk sebessége az anyagban és az eltérés az egyensúlyi hidrogéntartalomtól.

4.2. A hőmérséklet hatása a hidrogénoldódásra

A gáz közegből való hidrogén-elnyelés folyamatának energetikailag két fontos mozzanata van: a H_2 molekulák disszociációja a felületen, amely minden esetben energiát igényel (endoterm folyamat), valamint a hidrogén atomok oldódása a fémekben, ami az anyag aktuális és egyensúlyi hidrogéntartalmától függően lehet endoterm és exoterm is.

A disszociációt hőmérséklet emelésével gyorsíthatjuk, de tapasztalatok alapján ezt inkább katalitikus hatású ötvözőkkel, felületi rétegekkel érdemes elérni. Az egyensúlyi hidrogéntartalmat a disszociáció sebessége nem befolyásolja (csupán a feltöltés idejét).



2. ábra: Fémek egyensúlyi hidrogéntartalma a hőmérséklet függvényében [1]

Az oldódási folyamat energiája szerint a fémeket két fő csoportba oszthatjuk: vannak a hidrogént endoterm (pozitív kötési energiájú hidridet képző) illetve exoterm módon oldó (negatív kötési energiájú hidridet képző) fémek (4. táblázat). Előbbiek jóval kevesebb hidrogént képesek oldani, bár egyensúlyi hidrogén-tartalmuk a hőmérséklet növelésével emelkedik, míg utóbbiak jelentősen több hidrogént oldanak, hőmérséklet emelkedés hatására csökkenő egyensúlyi hidrogéntartalom mellett (2. ábra). (Az energiaminimumra törekvésből következik, hogy pozitív kötési energiájú fémhidridek a valóságban nem jönnek létre, ezekben a fémhidridekben az egyensúlyi H/M arány sosem éri el az 1-et, amire a kötési energiák vonatkoznak; vagyis az endoterm oldódás azt jelzi, hogy 1-es H/M arány esetében ezek a fémhidridek túltelítettek.)

Mivel hidrogént nagy mennyiségben tárolni képes fémötvözet előállítására a cél, érdemes egy nagy hidrogénkötési energiájú (exoterm) fémet alapul venni, a reverzibilitást azonban elősegíti, ha ezt egy endoterm fémmel ötvözzük.

4.3. Melyek a jó hidrogéntároló anyagok?

Ideálisnak tekinthető az a tárolóanyag, amely nagy mennyiségű hidrogént képes megkötni ($H/M = 2$ már megfelelő hidrogén-sűrűséget jelent), a hidrogén kötési energiája viszont kellően kicsi ahhoz, hogy kis környezeti változás (pl. nyomásesés, hőmérséklet-emelkedés) hatására a megkötött hidrogén jelentős része felszabaduljon.

Az irodalomban a leginkább vizsgált anyagok a különböző fémek, fémötvözetek. (Bár végeznek kutatásokat grafit nanocsöves anyagokkal is [6].) A fémek felelnek meg leginkább az „ideális” hidrogéntároló felsorolt követelményeinek. Azonban a vizsgálatok során több fizikai-kémiai akadály is felmerült ezen tárolóanyagokkal kapcsolatban.

A feltöltés-kiürítési ciklus során a tároló anyagában jelentős változás következhet be: Egyrészt anyagszerkezeti változás: a legtöbb fém – elsőrendű kötést kialakítva – hidridet képez. Ez jelentős szerkezeti átrendeződéssel is járhat, ami után az anyag már nem kerül vissza eredeti állapotába a kiürítést követően sem. Ez az új anyagszerkezet lehet a hidrogénfelvétel szempontjából kedvezőbb is (egyes feltételezések szerint az első feltöltéskor lejátszódik egy ún. térfogati aktiválás [1]), azonban a legtöbb esetben ez az abszorbens fém mechanikai tulajdonságának jelentős leromlásával jár, sőt sok esetben az anyag néhány ciklus után egyszerűen elporlad.

Másrészt kémiai változás: a fémötvözetek komponenseinek hidridképző hajlama eltérő, illetve a tároló anyag egyes komponensei egymással vegyületet képeznek. Ennek következtében kialakulhatnak az egyes komponensekben feldúsult részek (klaszterek), az anyag kémiai inhomogénná válhat [7].

További gondot jelent sok fém igen erős oxidációs hajlama: a felületen kiépülő zárt oxidréteg ugyanis a hidrogén számára is átjárhatatlan [8].

A fémötvözeteken belül külön meg kell említeni az un. fémüvegeket. Ezek gyors hűtéssel folyékony állapotban „befagyasztott” fémötvözetek. Nincs határozott kristályszerkezetük, így a hidrogénfelvétel során lejátszódó fizikai változások hatására kevésbé roncsolódik az anyag; sőt, rendezetlen atomi szerkezetüknek köszönhetően a hidrogén diffúziója ezen anyagokon belül sokkal gyorsabb. (A szabályos kristályszerkezet a hidrogén számára nehezen átjárható, a rácshibák számának növekedésével a diffúzió sebessége növekszik. [7]) A fémüvegek előállításukból adódó további előnye a nagyon kis vastagság, vagyis a nagy fajlagos felület. A hidrogénelnyelés során az egyik kritikus folyamat a hidrogén megkötése a felületen, így az aktív felület növelésével növelhető az elnyelés sebessége.

A kutatás egy másik iránya a por állapotú hidrogéntároló fémötvözetek területe. Ezeknél egyrészt nem okoz gondot a már említett mechanikai roncsolódás, másrészt a nagy fajlagos felületen gyors abszorpciós-deszorpciós ciklus valósítható meg. Ezeknél a poroknál a problémát a szintereződés jelenti, vagyis idővel a szemcsék összetapadnak, így a por elnyelési tulajdonságai jelentősen romlanak. A kinetika gyorsítására valamint a szintereződés elkerülésére elterjedt módszer hidrogén tároló porok esetében a hidrogén felvétel/leadás közbeni őrlés (Reactive Mechanical Milling, Ball Milling). Ennek az eljárásnak értelem szerűen csak a kísérleti fázisban van létjogosultsága.

Jelenleg a BME Járműgyártás és -javítás tanszékén Zr és Mg alapú fémüvegek hidrogén gázkezegetőből való feltöltésének-kiürítésének kutatása folyik.

5. ÖSSZEFOGLALÁS, JÖVŐBENI FELHASZNÁLÁS

Tiszta energia szinte korlátlan mennyiségben áll rendelkezésünkre (a három legalapvetőbb: szél-, víz- és napenergia), azonban nem ott és akkor, ahol és amikor fel szeretnénk használni. Pár négyzetméter napkollektor elegendő energiát biztosít egy év alatt egy család évi energiaszükségletének fedezésére, ám éppen télen szolgáltatja a legkevesebb energiát, amikor a fűtésre a legtöbb kellene, míg nyáron rengeteg fölösleget termel. Este, éjszaka sok energiát használunk, amikor nem süt a nap, míg napközben alig – pedig akkor áll rendelkezésünkre bőséges napenergia. Ugyan így szélenergia is bőségesen áll rendelkezésünkre, csak nem pont akkor, amikor kellene. A vízierőművek éjjel-nappal egyenletesen termelik az elektromos áramot, nem pedig a lakosság igényeihez igazodva.

Ha találnánk egy olyan megoldást, amellyel nagy energiát lehetne jó hatásfokkal tárolni, és szükség szerint gyorsan mobilizálni, a mai világ pazarló energiaberendezkedését előrelátóvá, tudatosá és takarékosá lehetne tenni.

Elsősorban a közlekedés számára égető dolog, hogy találjon az emberiség a benzinhoz hasonló, nagy energiatartalmú, könnyen mobilizálható energiaforrást. Azonban az ipar számos más területén szükség van energiatárolókra.

Mivel az elektromos áram az energia legszélesebb körben, legjobb hatásfokkal felhasználható formája, célszerű olyan energiatárolót használnunk, amelyből elektromos áramot nyerhetünk. A mai legelterjedtebb ilyen energiatároló az akkumulátor. Mára az akkumulátoroknak is kiforrott technológiája van, azonban tárolókapacitásuk lassan eléri az elméleti felső határt, míg az energiaigény egyre növekszik.

Hidrogén tüzelőanyag-cellában való elégetésével szintén elektromos energiát nyerhetünk, azonban ez a rendszer jóval könnyebb, és kevesebb helyet is foglal.

5.1. Akkumulátor vagy hidrogén? Rövid technikai összehasonlítás

A hétköznapi akkumulátorok közül a mobiltechnológia jelenti a fejlődés élvonalát. Egy modern mobiltelefon akkumulátor tárolókapacitására a következő közelítő számítást végezhetjük:

Egy jobb, 20 g tömegű akkumulátor 1000 mAh · 3.6 V → 13 kJ energiát képes tárolni. 2 g/cm³ sűrűséggel számolva ez 650 kJ/kg fajlagos energiatartalmat és 1300 kJ/dm³ energiasűrűséget jelent. Ezek az adatok egy gépjármű ólom-akkumulátorára 250 kJ/kg és 1250 kJ/dm³ körül vannak (5 g/cm³ sűrűséggel számolva).

A hidrogén 120 MJ/kg fűtőértéke ezeknél az adatoknál közel 200-szor (!) jobb, amennyiben tiszta hidrogént tudunk tárolni és tökéletesen felhasználni, de ha a tároló 20-szoros túlsúlyával számolunk (a tárolóban mindössze 5 % hidrogéntartalom), még akkor is a mai legfejlettebb akkumulátorokhoz képest 10-szer nagyobb fajlagos energiatartalmat érhetünk el! Az üzemanyagcella méretét, és az elektromos energia előállításának hatásfokát számba véve is többszörösen könnyebb hidrogéntároló-üzemanyagcella rendszer építhető, mint egy azonos energiamentységet biztosító, Li-polimer akkumulátorokból felépíthető rendszer.

Ami a tároló térfogatát illeti: egy esetleges Mg alapú tároló és 5 % -os hidrogéntartalom esetében az energiasűrűség 3530 kJ/dm³, ami önmagában háromszor jobb a mai akkumulátoroknál, egy konkrét megvalósítás esetében (üzemanyagcellával és egyéb eszközökkel) tehát ez az érték is felvenné a versenyt a jelenlegi akkumulátoros technikával.

Mindent összevetve kijelenthetjük, hogy fajlagos energiatartalmat tekintve már a mai, kezdetleges technológiával megvalósítható abszorpciós hidrogéntárolóból és üzemanyagcellából építhető energiatároló rendszer is felveszi a versenyt, sőt egyes paraméterekben messze leghagyja a mai legfejlettebb akkumulátorokat – természetesen azt szem előtt tartva, hogy a tömeggyártásig még sok műszaki-technológiai-gazdasági problémát meg kell oldani a töltéstől kezdve a méretek csökkentésén át a versenyképes áron való előállíthatóságig.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Garaguly József: Hidrogén abszorpció-deszorpció vizsgálata amorf ötvözetekben, in situ ellenállásméréssel, doktori értekezés, Budapest 1998.
- [2] <http://tudastar.255.hu/2009/03/bmw-hidrogen-belsoegesu-motor-42.html> letöltve: 2009 augusztus
- [3] Dőry Zsófia: Hidrogéntechnológia alkalmazása szélenergia-termeléséhez TDK dolgozat, BME Gépészmérnöki kar, Budapest, 2008.
- [4] A. Bárdos, S. Bauer, W. Braun, P. Orbán, K. Schleede, P. Smith, Cs. Walczel: Increasing Motor Efficiency with a Copper Rotor, 26th Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry, Balatonfüred, 2009.
- [5] Dr. Prohászka János: Bevezetés az anyagtudományba I., Tankönyvkiadó, Budapest 1988.
- [6] Nature Vol. 414. 2001 november (Macmillan Mag. Ltd)
- [7] M. Savyak, S. Hirnyj, H-D. Bauer, M. Uhlemann, J. Eckert, L. Schultz, A. Gebert: Electrochemical hydrogenation of Mg₆₅Cu₂₅Y₁₀ metallic glass, Journal of Alloys and Compounds 364 (2004) 229-237.
- [8] F. D. Manchester and D. Khatamian: Mechanis for activation of intermetallic hydrogen absorbers, Mat. Sci. For. Vol. 31 1988, pp: 261-296;