

Körmöczi Andor, Horváth Gábor, Vass Csaba, Geretovszky Zsolt

A REPÜLŐGÉPIPARBAN HASZNÁLHATÓ AKKUMULÁTOR CELLÁK ÉS AZOK KÖTÉSEI

Napjainkban a környezettudatos gondolkozásnak köszönhetően nagy hangsúlyt fektetnek a hibrid és a tisztán elektromos repülőgépek fejlesztésére, amelyek az akkumulátorok korlátozott kapacitása miatt csak viszonylag kis távok megtételét/áthidalását teszik lehetővé. Munkánkban egy rövid bevezetőt követően bemutatjuk az ilyen repülőgépek akkumulátor bankjának általános felépítését, összehasonlítjuk a manapság használatos akkumulátorok legfontosabb, releváns paramétereit, a kémiajukat, és csomagolásukat. A mérnöki gyakorlat és a szakirodalom alapján sok (néhány száz darab) kis kapacitású (néhány Ah) cella soros, illetve párhuzamos kötésével lehet a repülőgépek számára megfelelő tulajdonságú akkubankot létrehozni. Összefoglaló tanulmányunk felvázolja a cellák lehetséges kötéseit, és a kötéskor használatos anyagokat. Munkánkat az EFOP-3.6.1-16-2016-00014 számú, „Disruptív technológiák kutatásfejlesztése az e-mobility területén és integrálásuk a mérnökképzésbe” című pályázat támogatja.

Kulcsszavak: Repülőgépipar, Elektromos és hibrid repülőgép, Akkubank létrehozása, Li-ion akkumulátor cella, Akkucellák kötése

BEVEZETŐ

Napjainkban a környezettudatos szemléletnek köszönhetően a tudomány számos területén a környezetbarát megoldások egyre nagyobb figyelmet kapnak. Nincs ez másképp a modern járművek fejlesztése kapcsán sem. A közlekedésfejlesztés szempontjából nem elhanyagolható továbbá az sem, hogy a Föld korlátozott mennyiségű fosszilis energiahordozóval rendelkezik. E probléma kiküszöbölése, enyhítése érdekében jöttek létre az új hibrid vagy teljes elektromos meghajtású rendszerek a hagyományos belső égésű motorok kiegészítéseként, alternatívájaként. Mindennapjainkban már tapasztalhatjuk ezen változó tendenciákat, hiszen a piacon számos új elektromos autó (Tesla Motors, Nissan, Honda, Hyundai, Kia stb.) jelenik meg nap mint nap. A repülőiparban ezen irányú fejlődés integrációja még kezdeti fázisban van, hiszen az elektromos meghajtású repülőgépek fejlesztése nagyobb kihívás elé állítja a mérnököket, kutatókat, mint az elektromos autóké. Ennek köszönhetően az elektromos meghajtású repülés fejlesztésében a kisrepülőkön, illetve a kísérleti megoldásokon túl még nem született piacképes megoldás. Az elektromos repülőgépek egyik legfőbb problémája az akkumulátor cellák korlátozott kapacitása, amely miatt csak viszonylag kis távok (~50–100 km) elérése lehetséges [1]. Ebből következően jelenleg a hibrid meghajtású rendszerek a dominánsak a teljes elektromos kivittel szemben. A hibrid járműveknek általában hagyományos (belső égésű) meghajtó rendszere van egy alacsony teljesítményű elektromos segédmotorral támogatva. A jövőre nézve biztató előjelek figyelhetők meg a teljesen elektromos meghajtású repülőgépek fejlesztésében, ugyanis olyan akkumulátor cellák létrehozásán kísérleteznek, mint például a Li-levegő cellák, amelyek elméletileg a manapság legismertebb Li-ion cellák fajlagos energiájától egy nagyságrenddel nagyobb fajlagos energiával rendelkeznek. Azonban ezen irányú fejlesztések még a kezdeti fázisban találhatóak (TRL 4 – laborvizsgálatok) [2].

A legelső elektromos motorral hajtott repülőgép felszállására már 1973 október 21-én került sor Ausztriában. E repülőgépbe az eredeti benzinmotor helyett egy 33 kg tömegű 10 kW névleges teljesítményű eredetileg targoncához használt elektromotort építettek be. A repülőgép hajtását 4 darab Ni-Cd akkumulátor biztosította, amely 12 perces üzemidőt tett lehetővé. Ez alatt a felszállás során elérték a 380 m-es magasságot. Az 1. ábrán az MB-E1 leszállás közben látható [3].



1. ábra: Az első elektromos repülőgép [3]

A 2. ábrán a 2016. áprilisát megelőző időszakban, Kecskeméten kifejlesztett Magnus eFusion típusú kisrepülőgép látható, mely teljesen elektromos hajtással rendelkezik. A gépet egy 28 kg tömegű 45 kW teljesítményű villanymotor hajtja, amely felszálláskor szükséges 80 kW-os teljesítmény leadására is képes. Energiaforrásként egy 8 darab 120 Li-ion cellát tartalmazó akkubankot használtak, amely maximum fél órás üzemidőt tud biztosítani [4]



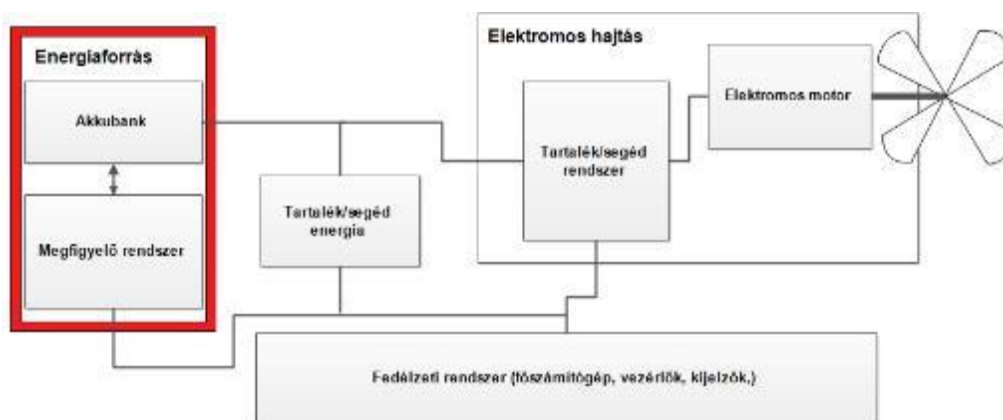
2. ábra Magnus eFusion elektromos repülőgép [4]

A környezettudatosság mellett az elektromos repülőgépek további előnye az olcsóbb a repülőgépgyártás, alacsony üzemeltetési költség, sőt sokkal kisebb zajterhelést kapnak az utasok, mint a hagyományos motorok esetén

2. ENERGIATÁROLÁS

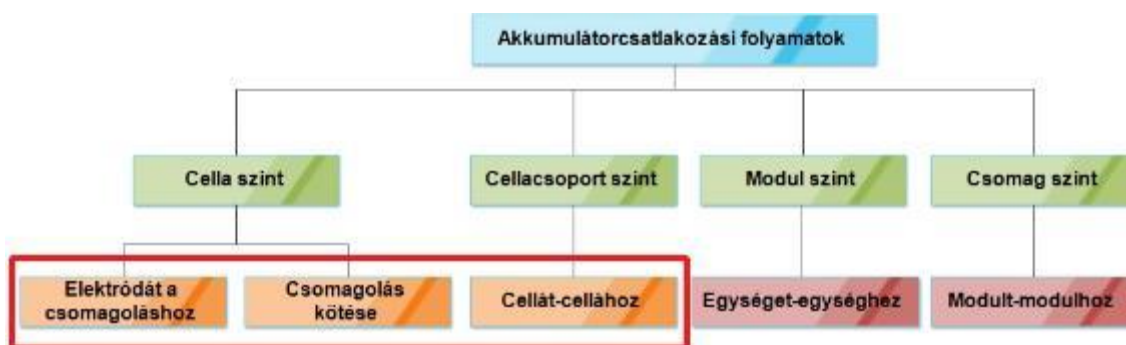
Tanulmányunk a repülőgépek energiatárolási rendszerét egy általános elektromos repülőgépben megvalósított hajtásrendszer blokk vázlatára keresztül szeretné bemutatni [5]. Ez látható a 3. ábrán. Az ábra alapján megfigyelhető, hogy a hajtásrendszer három fő részre bontható: az elektromos hajtásra, a fedélzeti rendszerre és az energiaforrásra. Az elektromos hajtás a motorból,

illetve tartalék/segéd rendszerből áll. A fedélzeti rendszer tartalmazza a fő számítógépet, a vezérlőket, illetve a kijelzőket. Az energiaforrás pedig az akkumulátort és annak megfigyelőrendszerét foglalja magában. Az utóbbi energiaforrás modul akkumulátorbankjának létrehozása képezi tanulmányunk tárgyát.



3.ábra Példa egy elektromos repülőgép hajtásrendszerének blokkvázlatára [5]

A mérnöki gyakorlat szerint az akkubankokat sok egyedi cella összekötésével alakítják ki mely módszerrel egy jól testre szabható, moduláris, könnyen monitorozható rendszert kapunk. A valós idejű monitorozásért az akkumulátor megfigyelőrendszere a felelős, amely általában hőmérséklet mérést (NTC termisztor) és feszültség mérést tartalmaz; a kapott értékeket továbbítja a fő számítógépnek az esetleges meghibásodások kezelése érdekében. A tanulmányunk egyik célja a repülőgépipar számára jelenleg elérhető nagy kapacitású akkubankba köthető kis kapacitású cellatípusok áttekintése, bemutatása, valamint a lehetséges jövőben használatos, ígéretes technikák felvázolása.



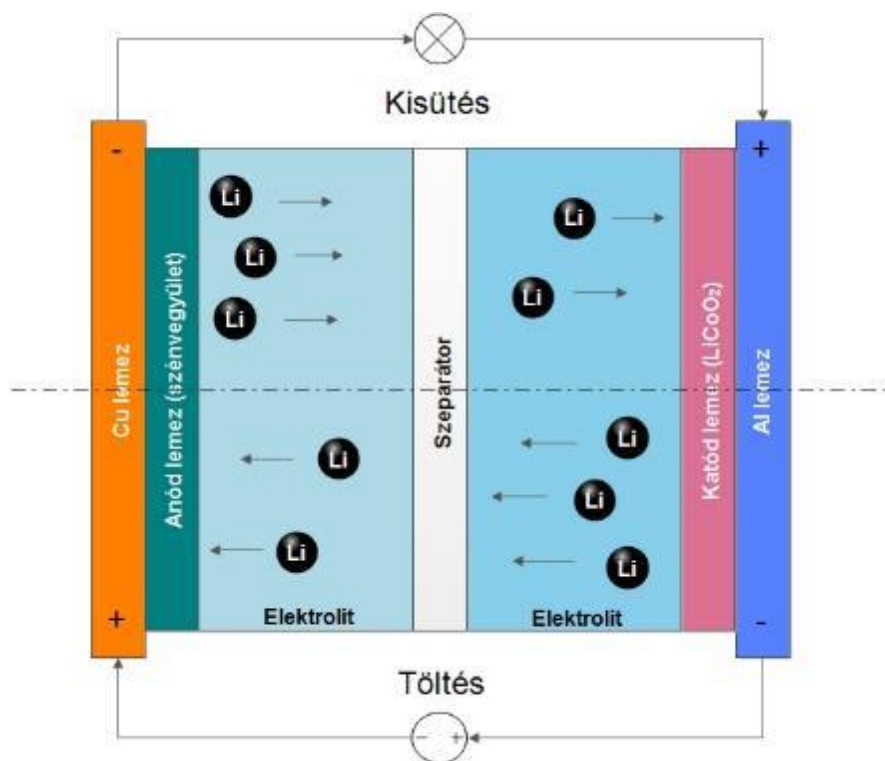
4.ábra Az akkumulátorrendszerek többszintű csatlakozási módjai [6]

A nagykapacitású akkumulátorrendszerek 4. ábrán bemutatott többszintű csatlakozási módszerek alkalmazásával hozzák létre. Figyelembe véve azt, hogy a különböző akkumulátor cellák egyedi műszaki jellemzőkkel rendelkeznek, elmondható, hogy a kapcsolódás különböző szintjein nincs univerzális csatlakoztatási technika. Ennek ellenére általában elmondható az, hogy a csomag (pack level), és modul (module level) szintjén mechanikai csatlakozást (szegecseles, csavarozás), míg ennél „alacsonyabb” (cell, unit level) szinten már finomabb kötéseket (hegesztés, vagy forrasztás) alkalmaznak, ezzel csökkentve az össztömeget, az elektromos ellenállást, és javítva a mechanikai tulajdonságokat [6]. Tanulmányunk másik célja az elemek kötésekor használatos anyagok, és azok kötéseinek áttekintése, összevetése.

AZ AKKUMULÁTOROK KÉMIAJA

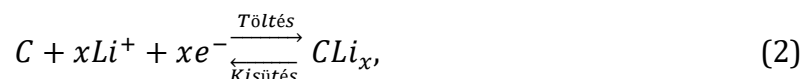
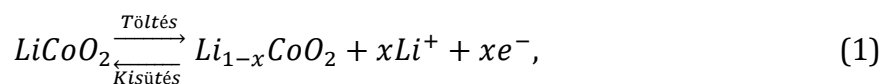
Az akkumulátor a galvánelemek családjába tartozó energiatároló egység. Működési elve szerint töltéskor a villamos energiát kémiai energiává alakítja, ezt ilyen formában huzamosabb ideig tárolni tudja, majd a kisütéskor ezt a kémia energiát villamos energiává alakítja vissza. Ebből kifolyólag közvetlenül csak egyenáram szolgáltatására alkalmas.

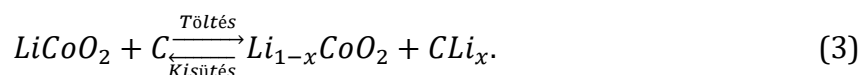
Az akkumulátorok elektródái kisütéskor a töltésszétválasztás miatt lassan átalakulnak. Az elem lemerült állapotba kerül, ha ez az átalakulás teljesen végbement. Töltés esetén azonban, a rákapcsolt feszültség hatására az elektródák eredeti állapotukba térnek vissza, vagyis fordított irányba megy végbe a folyamat, melynek eredménye a feltöltött energiaforrás. Tekintve, hogy az akkumulátorok közül az egyik legnépszerűbb az úgynevezett Li-ion akkumulátor technológia, így ezen a típuson keresztül mutatjuk be a működés kémiai részleteit. A működési elvének sematikus rajza az 5. ábrán látható [7][9].



5. ábra A Li-ion akkumulátor működési elve [7][9]

A Li-ion cella esetén a pozitív elektróda (katód) egy Li oxid, többnyire LiCoO_2 vagy LiMnO_2 , illetve a negatív elektróda (anód) általában szénvegyület, esetleg grafit. Az anódot és a katódot egy szerves folyékony elektrolit választja el egymástól, általában ez LiPF_6 (lítium-hexafluorofoszfát), vagy újabban a kevésbé korrodálódó LiBF_4 (lítium-tetrafluoroborát). A Li-ion elemekben végbemenő kémia folyamatokat a következő egyenletek írják le: (1)-katód, (2)-anód, (3)-teljes elem [7][8][9]:





Jól látható, hogy töltés során a Li-ionok a szénalapú elektródhoz, míg kisütéskor pedig a fém-oxid alapú katódhoz vándorolnak. Innen kapta ez a lítiumion-technológia a nevét is, hiszen a töltéstárolásról a Li-ionok gondoskodnak. A további akkumulátor típusokat az alábbi 1. táblázat foglalja össze a különböző tulajdonságaikkal együtt. A Li-ionhoz hasonlóan a többi típus neve a működési elvére utal. A repülőgépgyártás szempontjából az akkumulátorok legfontosabb tulajdonsága a fajlagos energiája (egységnyi tömegre jutó tárolt energia), hiszen ez határozza meg a repülőgép levegőben való tartózkodásának maximális idejét.

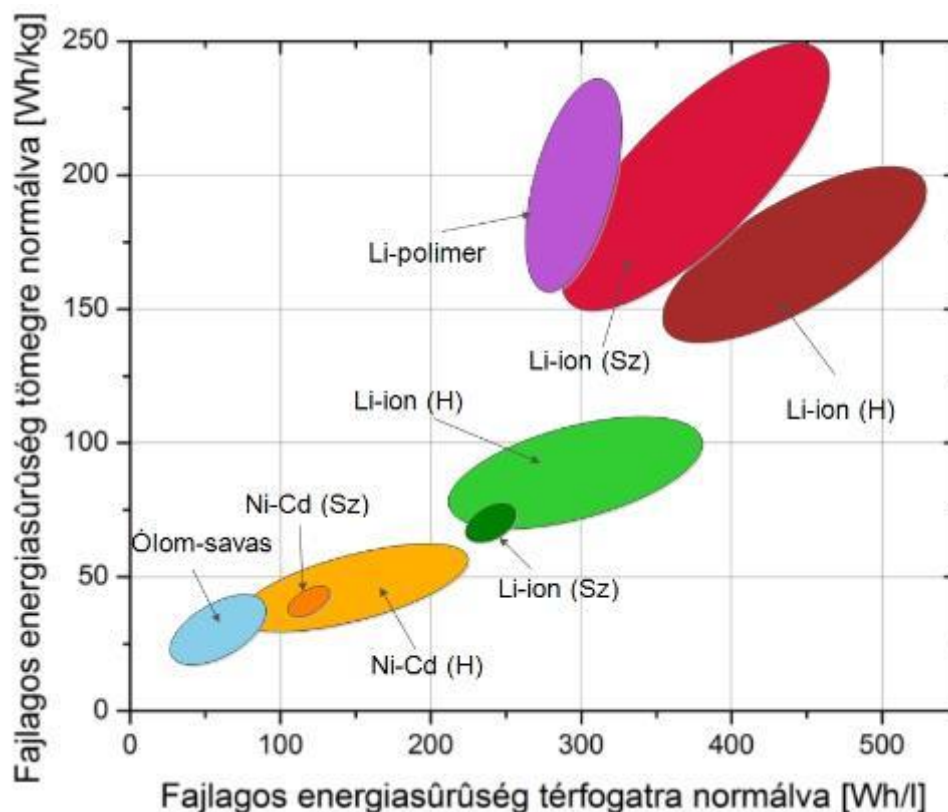
Akkutípus	Fajlagos energia [Wh/kg]	Feszültség [V]	Töltési ciklusok	Ár [\$/Wh]	Töltés/kisütés hatékonysága [%]
Ólom-savas [12]	30-50	2	200-300	56-145	50-92
Li-ion [10]	90-260	3,6	500-1000	356	99,9
Li polimer [10]	100-130	3,7	300-500	356	99,9
Ni-Cd [11]	45-80	1,2	1000	270	75
Ni-MH [11]	60-120	1,2	300-500	297	66
Ag-Zn [12]	250	1,3-1,6	5-200	~500-1000	95
Li-levegő (jövő)[13]	13000 (elméleti)	1,7-3,2	50 (első kis.)	?	?

1. táblázat Különböző típusú akkumulátorok tulajdonságai [10]–[13]

Jól látható, hogy az ólom-savas kémiával rendelkező elem a legkisebb fajlagos energiát szolgáltatja (30–50 Wh/kg). Ezen kívül a töltési ciklusok számában, illetve a hatékonyságban is elmarad társaitól. Az elérhető tulajdonságai ellenére a legalacsonyabb ár miatt még mindig sok helyen használatos technika. Ni-Cd típusú elem már jobb jellemzőkkel rendelkezik, akár 80 Wh/kg fajlagos energiát is el lehet érni ezzel a típussal 1,2 V feszültség mellett. Nagy előnye a magas, akár 1000 töltési ciklus lehetővé tétele. A Ni-MH (Nikkel-metál-hidrid) technikával ezzel szemben nagyobb fajlagos energia (120 Wh/kg) érhető el, de jóval kedvezőtlenebb a maximális töltési ciklusok száma (300–500). Az előzőkkel közel azonos jellemzőket lehet elérni a Li-polimer kémiájú elemcsaláddal. Fajlagos energia szempontjából a két legjobb elemtípus a Li-ion és az Ag-Zn típusú, melyekkel közel 250 Wh/kg fajlagos energia érhető el. Sajnos ez utóbbi két, céljainkhoz előnyös cella ára magasabb a többi akkutípusénál.

A 6. ábra a fajlagos energia szempontjából ábrázolja a különböző akkumulátor családokat [14]. Az 1. táblázat és a 6. ábra alapján a Li-ion, és az ezüst-cink technika tűnik a jelenleg elérhető technikák közül a legjobbnak az elektromos repülőgépipar számára, hiszen azok fajlagos energiája a legnagyobb.

Az ezüst-cink technológia még nem kiforrott akkutípus, jelenleg még csak a hadiparban, és az űrkutatásban használják; ára a legmagasabb a bemutatott típusok közül. További hátránya, hogy sokkal kisebb feszültség kibocsátásra képes, illetve a töltési ciklusok számában is elmarad a Li-ionos technikától.



6.ábra Akkumulátor típusok összehasonlítása [14]

A Li-ionos család közül a Li-alumínium technika 260 Wh/kg fajlagos energia elérésére képes, ami a jelenleg ismert legnagyobb fajlagos energia, amit a tömeggyártásra alkalmas akkumulátor cellákkal el lehet érni. A Li-ion akkuk 3,6 V feszültség leadására képesek, az élettartamuk magas, akár 1000 töltési ciklus is elérhető velük. A töltés során közel 100%-os hatékonysággal tudják az energiát tárolni. Egyedül az ár az, amivel elmarad a többi akkumulátor családtól, hiszen az egyik legjobb tulajdonságú akkutípusról beszélünk. A Li-ion technika további előnyei között felsorolandó az, hogy a lítium a legkönnyebb fémek közé tartozik, így az ebből készült akkumulátorok általában sokkal könnyebbek és tartósabbak is mint a társai. Továbbá nem képződnek a folyamat során kristályok, ezért az elem nem rendelkezik memóriaeffektussal. Ez azt jelenti, hogy nem kell őket rendszeresen tréningeztetni (teljesen lemeríteni, majd teljesen feltölteni), sőt óvni kell őket a teljes kisütéstől. A repülőgép-gyártás szempontjából fontos tulajdonság az is, hogy kevés mérgező anyagot tartalmaznak. E celláknak különböző biztonsági előírásoknak is eleget kell tenniük: ebből következik e cellatípus legnagyobb hátránya: egy védőáramkört kell beleintegrálni, ami a túltöltés során termelődött hő ellen véd [7][8][9]. A sok jó tulajdonsága mellett manapság a repülőgépek számára készült korszerű Li-ionos akkumulátor bankok is kevesebb mint egy órás repülési időt tesznek lehetővé a fajlagos energia értéke miatt.

A jövőre nézve az elektromos repülőgépipar szempontjából tehát a jelenleg ismert akkumulátorok tovább fejlesztésére van szükség. A kutatók, fejlesztőmérnökök biztató eredményekről számoltak be az úgynevezett Li-levegő típusú technikával kapcsolatban, hiszen ezek fajlagos energiájának elméleti értéke elérheti akár a 13 kWh/kg-os értéket, ami megegyezik a benzin, mint üzemanyag fajlagos energia értékével. Ennek ellenére laborkísérletek során még csak 1 kWh/kg-os fajlagos energiát sikerült elérniük ilyen típusú akkumulátorral, illetve az

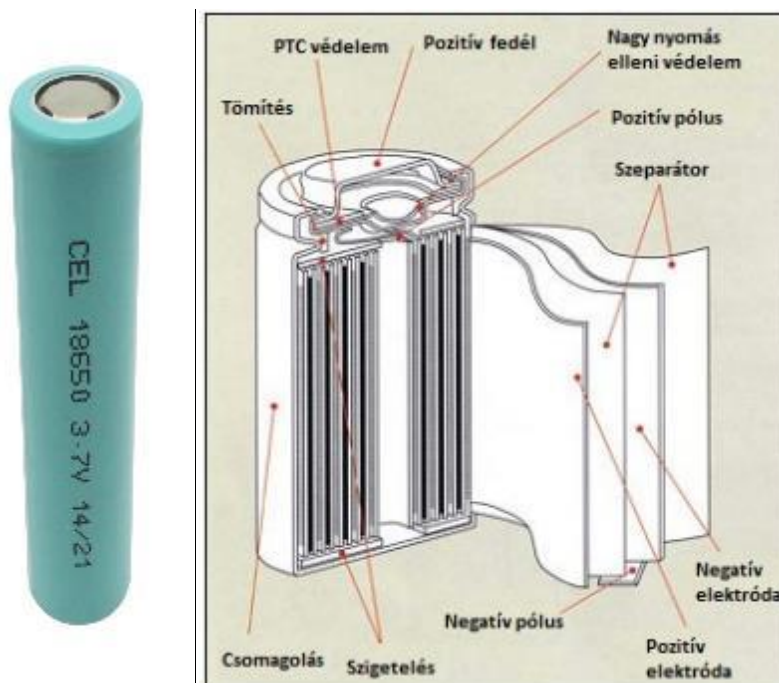
élettartamuk is az 50 töltési ciklust alig éri el, ami valószínűleg jelenleg még instabil kémiai reakciók eredménye. Azonban ezek a fejlesztések még a laborkísérletek szintjén járnak, tehát bőven van benne még fejlesztési lehetőség [2][15].

AKKUMULÁTOROK GEOMETRIÁJA

Az akkumulátorokat nem csak működési elvük szerint tudjuk csoportosítani, hanem geometriájuk alapján is. Így megkülönböztethetünk hengeres, szögletes, tasakos, és gombelem kialakítású cellákat. A gombelemek olcsóak és kicsik, de csak kis feszültség leadására képesek, többségük nem újratölthető, és hosszú feltöltési idővel rendelkeznek [16]. Többek között ezért sem releváns kialakítás az elektromos repülőgépek akkumulátorbankjai szempontjából, így részletesen e típust nem ismertetjük. Valamint ez esetben több kötésre lenne szükség az akkubankok létrehozásához, ami a hibalehetőségek számát növelné.

Hengeres cella

A hengeres cellatípus manapság az egyik legszélesebb körben használt forma az elsődleges (egyszer tölthető) és másodlagos (újratölthető) cellák esetén, hiszen a legnagyobb előnyei közé tartozik a viszonylag egyszerű gyártási eljárás és a jó mechanikai stabilitás. A hengeres cellák a biztonsági előírásnak is eleget tesznek, ugyanis rendelkeznek a felmelegedés elleni védelemmel, nyomáscsökkentő mechanizmussal, és maga a henger alakú cső is ellenálló a belső nyomás okozta deformálódásnak. További előnyei közé sorolható, a hosszú élettartam, töltési ciklusok magas száma, illetve az ára. A hengeres kialakítás miatt a szorosan egymás mellé rendezett cellák térkihasználása sem optimális, valamint e cellák repülőgépeken való használatát a viszonylag nagy tömege is korlátozza. A kis hengeres cellákat általában orvosi, és hordozható számítástechnikai eszközökben használják, míg a nagyobb méretű hengeres cellák a növekvő elektromos járművekben népszerűek [16][17]. A 7. ábrán egy hengeres cella, és annak sematikus rajza látható.



7. ábra Hengeres cella és felépítésének sematikus rajza [16]

A hengeres kialakításon belül a jelenleg három népszerűbb szabványosított modell a 18 650, a 21 700, és a 26 650. E cellák nevesebb gyártóinak legjobb tulajdonságú típusai közül mutat néhány típust és a legfőbb tulajdonságait példaként a 2. táblázat.

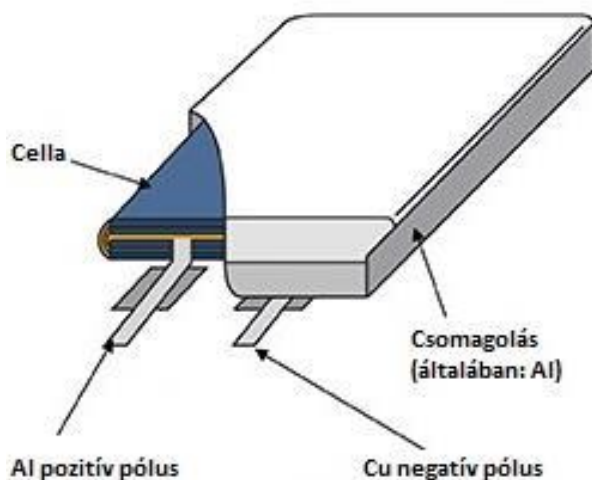
Akkutípus	Kapacitás [mAh]	Feszültség [V]	Tömeg [g]	Fajlagos energia [Wh/kg]
Hengeres 18650 Li-ion (Panasonic) [18]	3200	3,6	47,5	243
Hengeres 18650 Li-ion (LGChem) [19]	3000	3,6	47	230
Hengeres 18650 Li-ion (Sony) [20]	2600	3,6	44,3	211
Hengeres 26650 Li-ion (Panasonic) [21]	5000	3,7	85	218
Hengeres 26650 Li-ion (Energic)[22]	3500	3,6	83	152
Hengeres 21700 Li-ion (IJoy)[23]	3750	3,7	70	198
Hengeres 21700 Li-ion (Samsung)[24]	4800	3,6	67,4	256
Hengeres 21700 Li-ion (Tesla)[24]	4800	3,6	60	296
Szögletes 103450 Li-ion (Panasonic) [25]	2200	3,6	38,3	207
Szögletes 103450 Li-ion (LGChem) [26]	2000	3,7	41	180
Tasakos Li-polimer (A123) [27]	19500	3,3	496	130
Tasakos Li-polimer (Farasis) [28]	25000	3,65	485	188

2. táblázat Nevesebb gyártók legjobb tulajdonságú akkumulátor típusai, és azok főbb paraméterei [18]–[28]

Az elnevezések a cellák méretei utalnak, tehát például a 18650-es esetben a cella 18 mm széles, és 65 mm magas. A 18650-es kialakítás a fent megnevezett három típus közül még mindig a legnépszerűbb, 2013-ban például 2,55 milliárd cellát gyártottak le belőle világszerte. Ezzel a típussal 3200 mAh az elért legnagyobb kapacitás, ami 243 Wh/kg fajlagos energiát eredményez [16]. Számos alkalmazási területe van, kezdve a szerszámoktól, orvosi eszközökön át, egész az elektromos járművekig. A 26650-es modell nem ennyire népszerű, ami a vastagabb kialakításnak, a kisebb kapacitásának és fajlagos energiájának köszönhető. Ennek ellenére ez is széles körben használatos [16]. A 21700-as kialakítás az ideig, 2017-es év nagy slágerévé vált, hiszen Tesla gyárban idén júniusban kezdték őket sorozatban gyártani, és várhatóan az új autómódelljükben is már ezt fogják használni. A térfogatnöveléssel 4800 mAh-ás kapacitású cellát hoztak létre az első modellekben, ami közel 300 Wh/kg fajlagos energiát eredményez, ami a 18650-os képest jelentős előrelépés. Meg kell említeni, hogy ezek az értékek az első fejlesztések eredményei, mely a szakértők szerint a további fejlesztések révén elérheti akár a 350 Wh/kg-ot is. Ezen jó fajlagos energia mellett megtartotta a 18650-es főbb előnyét is az egyszerű és olcsó gyártást [24].

Szögletes cella

A hengeres cellákkal ellentétben a szögletes kialakítás kulcsfontosságú előnyei a vékony profil, a viszonylag kis tömeg, hiszen a váza általában alumíniumból készül, és a helytakarékos felhasználási lehetőség. A vékony négyszögletes alakja a terméktervezők számára könnyebb beépíthetőséget biztosít. A szögletes cellákat jellemzően mobiltelefonokban, tabletekben és más elektronikai eszközökben használják. Míg a jó térkitöltésük a szögletes cellákat nagyon vonzóvá teszi, számos hátránya létezik, mint például, hogy az előállításuk költséges, nincsenek szabványosított méretek, kisebb élettartammal rendelkeznek, mivel a hőelvezetésük kevésbé hatékony a hengeres kialakításhoz képest, és viszonylag könnyen deformálódik mechanikai igénybevétel esetén [16][17]. A 8. ábrán egy szögletes cella sematikus rajza látható.



8. ábra Szögletes cella sematikus rajza [29]

Sajnos nem léteznek kifejezetten szabványosított méretezései a szögletes cellacsaládnak, minden gyártó saját maga szabja meg a szükséges méretet; a legelterjedtebb típus a 103450 típus-számú. Hasonlóan a hengeres elemekhez a típuszám itt is a cella méreteit jelöli, tehát példánkban egy 10 mm vastag, 34 mm széles, és 50 mm hosszú a celláról beszélünk. A 2. táblázat e típus két nevesebb gyártójától készült legjobb tulajdonságú celláinak főbb adatait tartalmazza. Megfigyelhető, hogy a szögletes cellák fajlagos energia értékei messze elmaradnak a hengeres kivitel által szolgáltatott értékektől.

Tasakos cella

A szögletes cellák továbbfejlesztése során egy új elemtípust hoztak létre tasakos cella néven. Tulajdonképpen egy szögletes cella, amely elvesztette a merev vázát. Ez a felépítés a leghatékonyabb helyhasználatot teszi lehetővé, illetve így 95%-os belső térkitöltés is elérhető, ami a legmagasabb érték az akkumulátorok között. Ezen felül a fémburkolat eltávolítása további tömeg csökkenést eredményez. Ennek ellenére, ha több cellát szeretnénk összekötni alkalmazni egy tartóra lesz szükség, továbbá a cellák 500 töltési ciklus alatt képesek akár 10%-os térfogat növekedésre is, amit az elrendezésük során figyelembe kell venni. Szögletes kialakításhoz hasonlóan nincs szabványosított cellaméret, minden gyártó saját maga tervezi meg. A tasakos cellák általában Li-polimer kémiával működnek. Továbbá nagy áramot képesek leadni, de kis terhelés és a mérsékelt töltés mellett a legjobbak. Általában autóiipari, és katonai alkalmazásaik vannak [16][17].

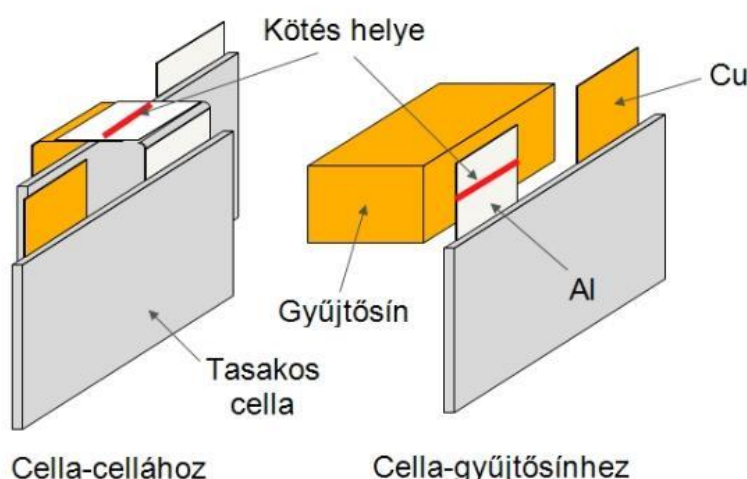
A tasakos cellákat általában a kapacitásuk alapján nevezik el. A 2. táblázat a tasakos cellák két nevesebb gyártójától készült legnagyobb kapacitású celláinak tulajdonságait tünteti fel. A fent említett a123 által gyártott 20 Ah cella méretei: 7,25 mm vastag, 160 mm széles és 227 mm hosszú. Annak ellenére, hogy a fent említett tasakos cellák sokkal nagyobb kapacitással rendelkeznek a többi cellacsaládhoz képest, e cellák rendelkeznek általában a legkisebb fajlagos energiával.

Összegzés I.

Az elektromos repülőgépek szempontjából olyan elemeket kell keresni, amelyek fajlagos energiája, azaz az egységnyi tömegre jutó energiája a legnagyobb. A jelenlegi ismereteink szerint elmondható az, hogy a Li-ion és az ezüst-cink elemek azok, amelyek esetleg megfelelőek lehetnek erre a célra, hiszen azokkal 250 Wh/kg-ot meghaladó fajlagos energia is elérhető. Az ezüst-cink elemtípus más tulajdonságokban jóval elmarad a Li-ion technikától: magasabb árral rendelkezik, továbbá sokkal kisebb feszültség kibocsátásra, és alacsonyabb töltési ciklus elérésére képes. A Li-ion technikák közül jelenlegi állás szerint a 21700-as hengeres modellt érdemes használni, hiszen ezek rendelkeznek a legnagyobb fajlagos energiával, képesek elérni akár a 300 Wh/kg-os értéket is a legújabb Tesla gyártmányú elemek. Azonban ezek még mindig jóval elmaradnak a kőolajszármazékokkal elérhető energia értékektől (13 kWh/kg). A jövőben a Li-levegő technika lehet az, amely megközelítheti ezt a korlátot.

AKKUMULÁTOR CELLÁK KÖTÉSEI, ANYAGAI

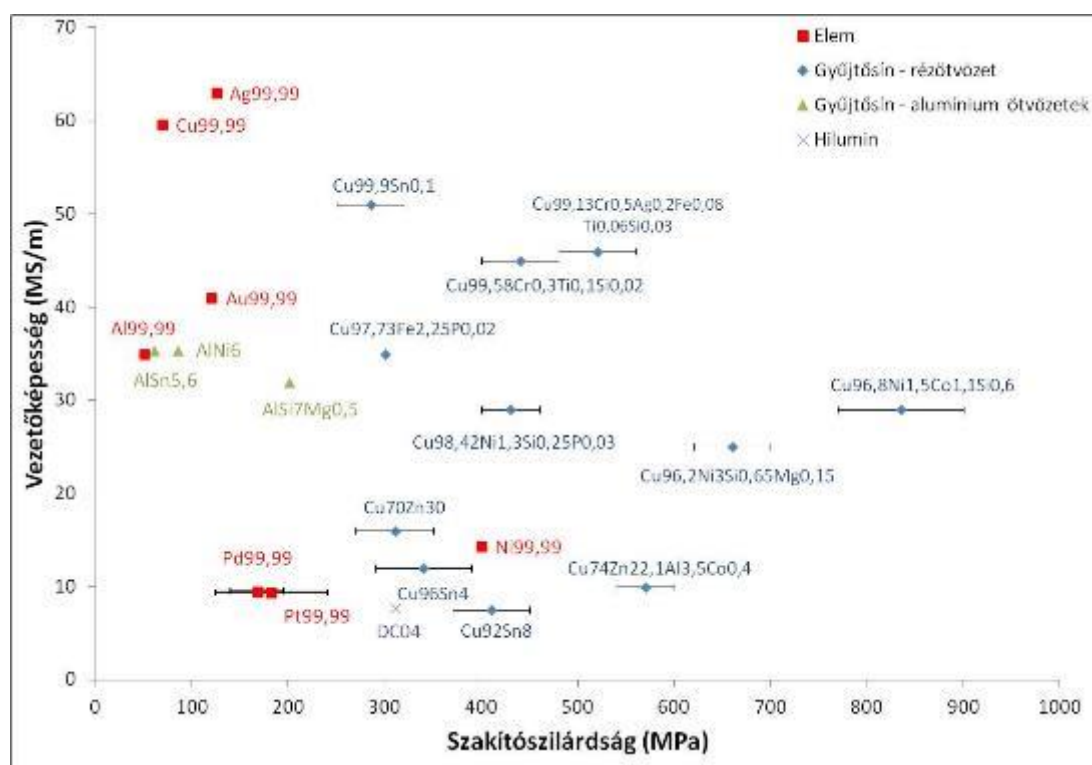
Az elektromos repülő gépek számára elengedhetetlen a nagy teljesítményű akkubank létrehozása, ezt mérnöki tapasztalatok alapján kisebb kapacitású akkumulátor cellák soros, illetve párhuzamos összekötésével lehet létrehozni. Az akkubankok készítése során az elektromos és mechanikai kötések létrehozására ilyen szinten általában hegesztést vagy forrasztást alkalmaznak. A sok kis cella kötését két féle módon szokás megoldani: vagy egymáshoz rögzítik közvetlenül, vagy gyűjtősín segítségével kötik őket össze [30]. A 9. ábra a két kötési mód sematikus ábráját mutatja be.



9. ábra Kötési módok sematikus ábrája [30]

Mindkét eset bonyolult anyagtudományi problémához vezet. Elektromos repülőgépekhez létrehozott akkubankok kötése esetén a felhasznált anyagok egyaránt fontos tulajdonsága a

vezetőképessége és a szakítószilárdsága is, így ezek függvényében a kötések során esetlegesen felmerült anyagok láthatóak a 10. ábrán [31]. A Li-ion hengeres cellák esetében a kivezetéseinek anyaga általában az úgynevezett hilumin, ami egy vékony (1–5µm) nikkel réteggel bevonatolt DC04 acél (0,1–1,2 mm vastag). A DC04-es acél egy vasalapú (Fe) ötvözet, amely maximálisan 0,08% szént (C), 0,03% foszfort (P), 0,03% ként (S), és 0,4% mangánt (Mn) tartalmazhat. Szögletes és tasakos cellák esetén általában az anód anyaga réz (Cu), esetleg nikkel (Ni), a katód anyag pedig alumínium (Al). Gyűjtősínként legtöbbször használt anyagok a réz, valamilyen ötvözetei (bronz), illetve alumínium. Általában elmondható, hogy a réz, és azok ötvözetei jobban teljesítenek vezetőképesség, és szakítószilárdság szempontjából, de az alumínium 70%-kal könnyebb, mint a réz, így általában azokban a rendszerekben, ahol az össztömeg is fontos szempont, érdemes az alumínium alapú gyűjtősín használatának lehetőségét mérlegelni. Azonban léteznek anyagok, amelyek még jobban teljesítenek a vezetőképesség és a szakítószilárdság szempontjából a réznél is, mint például az ezüst, de azok magas áruk miatt nem használhatók ilyen rendszerekben.



10. ábra A kötések során felhasználható anyagok a vezetőképességük és a szakítószilárdságuk szerint [31]

Tehát a kötések során érdemes megvizsgálni a hilumin, a réz, az alumínium, és kombinációinak hegeszthetőségét. Általánosságban elmondható, hogy az anyagok saját magukkal jól köthetőek, így a továbbiakban a kombinációik tulajdonságával foglalkozunk. A 3. táblázat fontosabb fémkombinációk hegeszthetőségét mutatja be.

Jól látható, hogy a réz-vas és a réz-alumínium kötések jól kezelhetők, habár komplex struktúrák megjelenhetnek, és ezek a szakítószilárdságra hatással lehetnek. Ezzel szemben az alumínium és a vas közötti kötést nagy kihívás megfelelően megvalósítani [32]. Ennek oka a nagy eltérés olvadáspontokban (Al – 660 °C és Fe – 1550 °C), és a metallurgiai inkompatibilitás: szinte nincs egymásba való oldódás, rengeteg IMC (intermetallikus vegyület) keletkezik. Az

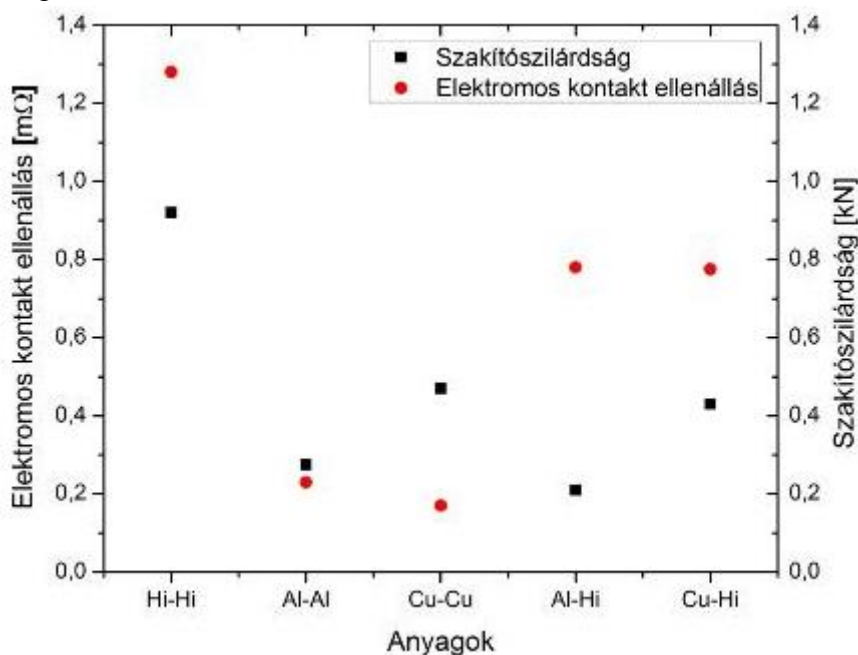
alumíniumban gazdag IMC-k (FeAl_3 , $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ stb.) rendkívül ridegek és törékenyek. Ez látható a 11. ábrán is, hiszen míg a réz-hilumin kötéssel gyakorlatilag megegyező elektromos tulajdonságú kötés érhető el, addig a mechanikai tulajdonságok szempontjából kétszer gyengébb a kialakult varrat szakítószilárdsága (430, illetve 210 MPa) [33].

	Al	Au	Cu	Pt	Ni	Fe	Ti	W
Al	-	I	K	I	I	I	I	I
Au	I	-	J	J	J	K	I	N
Cu	K	J	-	J	J	K	I	N
Pt	I	J	J	-	J	J	I	I
Ni	I	J	J	J	-	K	I	I
Fe	I	K	K	J	K	-	I	I
Ti	I	I	I	I	I	I	-	I
W	I	N	N	I	I	I	I	-

3. táblázat Fémkombinációk hegeszthetősége

(K-komplex struktúrák létrejöhetnek, I-intermetallikus vegyület, J-jó oldódás, N –nincs elég adat) [32]

Az fentebb leírt IMC-k (alumíniumban gazdag) keletkezésének csökkentése érdekében leggyakrabban szilícium (Si), nikkel (Ni), és cink (Zn) tartamú hozaganyagokkal történő forrasztás lehet a megoldás. Ilyenkor az alumínium inkább a forrasztóanyagokkal képez vegyületet, mint a vassal, így főleg vas tartalmú Al-Fe IMC-k keletkeznek, amelyek összességében jobb mechanikai tulajdonságot biztosítanak [33].



11. ábra Hilumin, alumínium és réz, és azok kötéseinek tulajdonságai [33]

Összegzés II.

Mindent összevetve elmondható, hogy ha cella-cellához való kötést alkalmazunk, agyagtudományi szempontból nem ütközünk akadályba, hiszen anyagok saját magukkal könnyen köthetőek. Továbbá, ha a gyűjtősínes megoldás használunk, akkor a hagyományos gyűjtősínek közül az réz, és azok bronzötvözetei, amelyekkel anyagtudományi szempontból jó kötéseket lehet létrehozni, és ezáltal nagyobb szakítószilárdságú varratot tudunk elérni. Ellenben, ha kisebb

tömegű gyűjtősínekre van szükségünk, alumínium és azok ötvözeteit célszerű használni, azonban ez esetben már hozaganyaggal történő forrasztás segítségével kell létrehozni a kötést.

ÖSSZEFOGLALÓ

A tanulmányban bemutattuk a teljesen elektromos, vagy hibrid hajtású repülőgépek akkumulátor bankjának általános felépítését. Továbbá felvázoltuk az akkumulátorok közül a leggyakrabban használatos Li-ion cella működésének kémiai hátterét, majd összevetettük a jelenleg használt más technikákkal, különböző paraméterek mentén. Ezek után rátértünk a csomagolásuk szerinti csoportosításra, ahol megállapításra kerül, hogy a jelenleg elérhető, és használatos akkumulátor technikák közül a Li-ion elemcsaládból 21700-as konstrukciója az, ami a legjobb megoldást szolgáltathatja fajlagos energia (300 Wh/kg) szempontjából az elektromos repülőgépek számára. Azonban a napjainkban futó kutatásokból adódik, hogy a jövőre nézve talán a Li-levegő cella az, ami a kőolajszármazékok nyomába érhet.

A tanulmány második felében vázoljuk az akkucellák kötések felmerült anyagtudományi megfontolásokat. Az akkubankok készítése során az elektromos és mechanikai kötések létrehozására ilyen szinten általában hegesztést vagy forrasztást alkalmaznak. A cellák egymáshoz való hegesztése során a hialumin, a réz, az alumínium, és azok kombinációjuk kötése merülhet fel. Az egyedüli problémás kötést Fe-Al közötti varrat adja, hiszen ekkor IMC-k keletkeznek. Ebben az esetben legtöbbször a szilícium (Si), nikkell (Ni), és cink (Zn) tartamú hozaganyagokkal történő forrasztás jelentheti a megoldást. E téren a konkrét igények ismeretében jelentős kutatás-fejlesztési munka vár a témán dolgozó kutatókra, mérnökökre a kötési eljárások kifejlesztésében, optimalizálásában.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] I. Gál, I. Jankovics, Gy. Bicsák, Á. Veress, J. Rohács, D. Rohács: Conceptual design of a small 4-seater aircraft with hybrid propulsion system, IFFK 2017 (2017)
- [2] Advanced battery technologies, Techlink, Dan Swanson, [Online] elérhető 2017.11.07., url: <https://techlinkcenter.org/technologies/advanced-battery-technologies/>
- [3] A világ első elektromos repülőgépe, SRY Modellező könyvtár, Benedek – Simó, [Online] elérhető 2017.11.07., url: <http://users.atw.hu/sry/cikk205.htm>
- [4] Magnus Aircraft magyar start-up beszállítója a SIEMENS, Dr. Varga Gábor, [Online] elérhető 2017.11.07., url: <http://www.repulnijo.hu/magnus-aircraft-beszallitoja-siemens/>
- [5] R. Cipin, J. Kadlec, B. Klima, P. Hutak: Battery System for the Airplane VUT 051 RAY, ECS Transactions, 48 (1) 217-222 (2014)
- [6] S. Shawn Lee, Tae H. Kim, S. Jack Hu, Wayne W. Cai, Jeffrey A. Abell: Joining Technologies For Automotive Lithium-Ion Battery Manufacturing – A Review, MSEC2010-341682010, (2010)
- [7] About Li-ion batteries, nexxon, [Online] elérhető 2017.11.07., <http://www.nexxon.co.uk/technology-2/about-li-ion-batteries/>
- [8] Amorphous carbon material for negative electrode of lithium ion secondary battery and nonaqueous secondary battery comprising same, Noriyo ISHIMARU, Takashi Suzuki, Takefumi Kono, US20130244117 A1, (2013)
- [9] Yoshio M., Brodd R.J., Kozawa A.: Lithium-ion batteries (Springer, 2009), ISBN 0387344446
- [10] Summary table of lithium based batteries, Battery university, [Online] elérhető 2017.11.07., url: http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_216_summary_table_of_lithium_based_batteries
- [11] Summary table of nickel based batteries, Battery university, [Online] elérhető 2017.11.07., url: http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_215_summary_table_of_nickel_based_batteries

- [12] Summary table of alternate based batteries, Battery university, [Online] elérhető 2017.11.07., url: http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_217_summary_table_of_alternate_batteries
- [13] Summary table of future based batteries, Battery university, [Online] elérhető 2017.11.07., url: http://batteryuniversity.com/learn/article/bu_218_summary_table_of_future_batteries
- [14] Battery cell comparison, epec, [Online] elérhető 2017.11.07., url: <http://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>
- [15] Future batteries, Battery university, [Online] elérhető 2017.11.07., url: http://batteryuniversity.com/learn/article/experimental_rechargeable_batteries
- [16] Types of battery cells, Battery university, [Online] elérhető 2017.11.07., url: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells
- [17] Lithium-ion Cylindrical cells Vs. Prismatic Cells, Charlie Messina, [Online] elérhető 2017.11.07., url: <http://www.relionbattery.com/blog/lithium-cells-should-i-go-cylindrical-or-prismatic>
- [18] Panasonic, Lithium Ion NCR18650B datasheet
- [19] LGChem, Lithium Ion INR18650HG2 datasheet, 2014.10.13.
- [20] Sony, Lithium Ion US18650VTC5 datasheet, 2013.09.26.
- [21] Panasonic, Lithium Ion NCR26650A datasheet
- [22] Energic, Lithium Ion EC-TN26650HP datasheet
- [23] IJoy, Lithium Ion 21700 Battery datasheet
- [24] The new 21700 format Lithium Cells in 2017, electricbike, [Online] elérhető 2017.11.07., url: <https://www.electricbike.com/new-21700-cells/>
- [25] Panasonic, Lithium Ion NCA103450 datasheet, 2016.06.
- [26] LGChem, Lithium Ion ICP103450 datasheet, 2005.07.28.
- [27] A123 Systems, 20Ah Prismatic Pouch Cell datasheet, 2015.
- [28] Farasis, 25Ah Prismatic Pouch Cell – IMP06160230P25A datasheet, 2011.08.
- [29] Lithium-ion Batter Tabs, Targray, [Online] elérhető 2017.11.07., url: <https://www.targray.com/li-ion-battery/packaging-materials/tabs>
- [30] Tobias Solchenbach, Peter Plapper, Wayne Cai: Electrical performance of laser braze-welded aluminum–copper interconnects, Journal of Manufacturing Processes, 16 183-189 (2014)
- [31] Wieland-Werke AG, Strip for connectors datasheet,
- [32] Katayama S.: Handbook of laser welding technologies, Woodhead Publishing, (2013)
- [33] Philip A Schmidt, Patrick Schmitz, Michael F. Zaeh: Laser beam welding of electrical contacts for application in stationary energy storage devices, Journal of Laser Applications, 28/2 (2016)

BATTERIES FOR AVIATION INDUSTRY AND THEIR BONDING TECHNIQUES

Nowadays, the development of hybrid and full electric aircrafts is gaining more and more attention, due to environmental consciousness. Currently the limited capacity of energy storage systems allows for relatively small flight distances for these airplanes. After a brief introduction, the paper introduces the internal structure of the battery bank. Then, we compare the relevant the battery chemistry and the key packaging parameters of today's most used battery types, especially those that are aviation relevant. Based on the critical review of literature data and engineering practice, the best option is to create a battery pack for aircrafts that consists of many (typically several hundred) small capacity (some Ah) cells, by connecting them in parallel and series. Finally, our study also presents several potential cell bonding technologies and compares the materials used by these processes. The work is supported by the EFOP-3.6.1-16-2016-00014 project, entitled "Research and development of disruptive technologies in the area of e-mobility and their integration into the engineering education".

Keywords: Aviation, Hybrid and full electric aircraft, Battery bank, Li-ion battery, Bonding of battery cells

Körmöczi Andor (MSc) PhD Hallgató Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar Fizikai Intézet Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék kandor@titan.physx.u-szeged.hu orcid.org/0000-0002-3917-4636	Körmöczi Andor (MSc) PhD Student University of Szeged Faculty of Science and Informatics Institute of Physics Department of Optics and Quantum Electronics kandor@titan.physx.u-szeged.hu orcid.org/0000-0002-3917-4636
Horváth Gábor (MSc) PhD Hallgató Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar Fizikai Intézet Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék horvathgabor@titan.physx.u-szeged.hu orcid.org/0000-0002-6835-4230	Horváth Gábor (MSc) PhD Student University of Szeged Faculty of Science and Informatics Institute of Physics Department of Optics and Quantum Electronics horvathgabor@titan.physx.u-szeged.hu orcid.org/0000-0002-6835-4230
Dr. Vass Csaba, PhD Tudományos Munkatárs Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar Fizikai Intézet Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék vasscsaba@physx.u-szeged.hu orcid.org/0000-0003-1443-3360	Dr. Vass Csaba, PhD Research Fellow University of Szeged Faculty of Science and Informatics Institute of Physics Department of Optics and Quantum Electronics vasscsaba@physx.u-szeged.hu orcid.org/0000-0003-1443-3360
Dr. Geretovszky Zsolt, PhD Egyetemi Docens Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar Fizikai Intézet Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék gero@physx.u-szeged.hu orcid.org/0000-0002-7878-9174	Dr. Geretovszky Zsolt, PhD Associate Professor University of Szeged Faculty of Science and Informatics Institute of Physics Department of Optics and Quantum Electronics gero@physx.u-szeged.hu orcid.org/0000-0002-7878-9174

A tanulmányt a „Diszruptív technológiák kutatásfejlesztése az e-mobility területén és integrálásuk a mérnökképzésbe” című EFOP-3.6.1-16-2016-00014 projekt támogatja.



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-3-03-0424_Kormoczi_Andor_et_al.pdf

