

Lítium-ion akkumulátor cellák stressztesztelése magas töltőárammal

Matusz-Kalász Dávid, Bodnár István, Jenyó Tamás

Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Egyetemváros út 1, 3515 Miskolc-
Egyetemváros, Magyarország, david.matusz-kalasz@uni-miskolc.hu,
istvan.bodnar@uni-miskolc.hu, tamas.jenyo@uni-miskolc.hu

Absztrakt: Az utóbbi években az elektromos mobilitás világszerte egyre népszerűbb lett. Az elektromos járművek egyik veszélyforrása az energiatárolásra szolgáló lítium ion akkumulátor cellák. Ahogy a forgalomba hozott járművek száma nő, azzal egyenes arányban nő a kiegészítő járművek száma is. A cellák gyakran égnek ki közúti baleset, spontán cellazárlat, vagy akár a gépjármű feltöltése során. A kutatás Battery Management System (BMS) esetleges meghibásodása során a töltőáram megugrását és a megengedett érték jelentős túllépése esetében tapasztalható folyamatokat vizsgáltuk meg egyaránt új és használt cellák esetében. A töltőáram mértéke 5-30 A között változott. A vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy a már használt cellák sokkal érzékenyebbek a töltőáram megugrására, mint az új cellák. A kísérleteket során megfigyelhető robbanásokat és lángcsóvákat normál kamerával dokumentáltuk, de a hőmérsékleteket hőkamerával is figyeltük. Számos alkalommal az alkalmazott készülék által maximálisan érzékelhető 400°C fölé emelkedett a kiegészítő akkumulátorok hőmérséklete.

Kulcsszavak: lítium-ion; töltőáram; stresszteszt

1 Bevezetés

Az elmúlt évek nemzetközi tapasztalatai azt mutatják, hogy emelkedő tendenciát mutat a forgalomba hozott elektromos járművek száma, ebből fakadóan a lítium-ion akkumulátor pakkok tüzeinek száma is folyamatosan évről-évre nő. Nagyon fontos, hogy mindannyian megértsük ezen eszközök használatának tűzvédelmi kockázatait és felkészüljünk arra az esetre, ha valami probléma lépne fel használatuk során. Az elektromos járművekkel foglalkozó szakirodalom három alapvető tüzeseti forrást különböztet meg: spontán gyulladást (valamilyen gyártási hiba), túlterhelésből eredő (kiemelkedő a töltési ciklus során bekövetkező), valamint közúti beleset (fizikai behatás) során bekövetkező tüzesetet. A felsorolt eseteket befolyásolhatják még hőhatások (hősokk, extrém meleg vagy hideg),

amelyek lehetnek tüzesetek közvetlen forrása, vagy egyszerűen csak hajlamosító tényezők [1, 2].

Kutatásunknak nem célja az elektromobilitás rossz színben való feltüntetése, sokkal inkább a veszélyforrások magasabb szintű megértése és a káresetek megelőzésének támogatása. Kiemelendő, hogy az elektromos járművek csoportján belül nem magasabb a tüzesetek előfordulásának mértéke. Számos kutatás foglalkozik a témával, és szinte az összes kiemeli, hogy az elektromos motorral, valamint a belsőégésű motorral szerelt járművek összehasonlítása rendkívül összetett folyamat [1, 2, 3].

2 Lítium-ion akkumulátor cellák

2.1 Lítium-ion akkumulátor cellák felépítése és működése

Minden lítium-ion cella pozitív és negatív elektródából, az anódból és a katódból áll. Egy ionvezető elektrolit van közöttük. Ez garantálja a lítiumionok szállítását az elektródák között a töltési vagy kisütési folyamat során. A lítium energiatároló eszközök legismertebb formája a lítium-ion akkumulátorok, amelyekben folyékony elektrolitot használnak. Egy másik fontos alkotóelem az elválasztó. Megakadályozza az anód és a katód közötti közvetlen érintkezést, és ezáltal megakadályozza a rövidzárlatot. Kisütéskor lítium-ionok és elektronok szabadulnak fel az anód oldalon. Az elektronok átfolynak a külső áramkörön, és elvégzik az elektromos munkát. Ezzel párhuzamosan a lítium-ionok az elektrolitfolyadékban és az elválasztón keresztül a katódra vándorolnak. Töltéskor ez a folyamat megfordul.

A lítium-polimer akkumulátorban az elektrolit egy polimer réteg molekulaszervezetébe van beépítve. Ez azt jelenti, hogy a külön leválasztó elhagyható. A lítium-polimer energiatároló készülékek csak kis kisülési áramot képesek generálni. A polimer réteg azonban lapos kialakítást tesz lehetővé, ezért az ilyen energiaraktárakat elsősorban mobiltelefonokban és laptopokban használják. A vékonyrétegű lítiumcella egy energiatároló eszköz, amelyben az elektrolitot egy ionvezető üveggel helyettesítik. Ez lehetővé teszi a lítiumfém használatát és ezáltal a rendkívül nagy energiasűrűséget.

Általában anódként használják a grafitot (C), amelyet a CLP-rendelet értelmében nem kell címkézni.

A katódban sokféle anyagot használnak. A katód anyagának pontos összetétele nagymértékben meghatározza az olyan tulajdonságokat, mint az élettartam, a töltési idő és a teljesítmény. A katódban gyakran vasat, mangánt, kobaltot vagy nikkelt használnak [4].

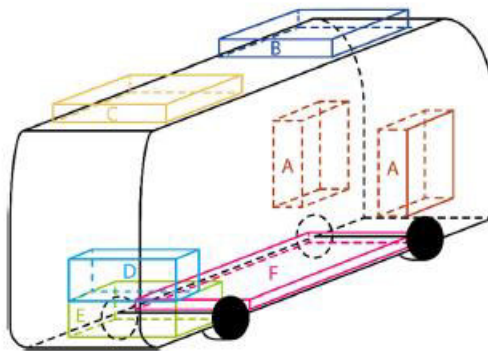
2.2 Lítium-ion akkumulátor cellák használata elektromos járművekben

Az akkumulátor pakkok gépjárművekben történő elhelyezésének elsődleges kritériuma, hogy megtaláljuk azt a legbiztonságosabb zónát a jármű felépítésében, ahol a legkisebb valószínűséggel érheti kár.

Az energiatárolási megoldások gyártónként és típusonként is nagyon eltérőek lehetnek. Tisztán elektromos személygépjárművek nagyobb pakkot igényelnek, ezek esetében a „Floor” vagy „T” megoldást alkalmazzák. Kis méretű és hibrid járművek esetén „Rear” megoldás is elfogadott, mivel elegendő a kisebb méretű akkumulátor csomag.

Nagyobb járművek, kiemelendők a buszok, esetében nagyobb tárolókapacitást kell biztosítani, az akkumulátor csomag mérete és tömege jóval meghaladja a személygépjárművek számára elegendő értékeket. Elektromos buszok akkumulátor csomagjainak lehetséges elhelyezési megoldásai a 1. ábrán vázoltak szerint [1, 5]:

- A: futóművek felett
- B-C: tetőn különböző pontjain
- D-E: busz hátsó végében
- F: utastér alatt, alvázba rejtett;
- működő megoldás lehet ezek kombinációja.



1. ábra

Akkumulátor csomagok lehetséges elhelyezése elektromos buszokban

2.3 Lítium-ion akkumulátor cellák használatának kockázatelemzése

1. lépés: A veszélyek és a kockázatnak kitett személyek azonosítása.

Elsősorban: járművezető és utasok. Biztonsági kockázat: magas, közvetlen veszélynek kitett. Másodsorban: karbantartást végző személyzet. Biztonsági kockázat: alacsony, közvetett veszélynek kitett.

2. lépés: A kockázatok értékelése és rangsorolása.

Ezek a típusú akkumulátorok nagyon nagy energiasűrűségűek és fokozottan tűzveszélyes elektrolitot tartalmaznak. Számos olyan eset fordulhat elő, amely a Li-ion akkumulátor gyulladásához vezethet, például: nem megfelelő töltőberendezés használata, vagy túltöltés, túlmelegedés vagy extrém magas hőmérsékletnek való kitettség, fizikai behatás (pl.: elejtés, törés, lyukasztás és/vagy erős rezgés), rövidzárlat, akkumulátor cella hiba, vagy rendszerhiba, gyártási hiba vagy szennyeződés a gyártás során.

Kockázati rangsor felállítása: A rangsor tekintetében nagyon eltérőek a szakmai vélemények, nem lehet egyértelmű rangsort felállítani.

A Li-ion akkumulátorok súlyos meghibásodása olyan mértékű hőtermeléshez vezethet, ami egy úgynevezett hőmegfutást (thermal runaway) okoz. Ennek során rendkívül heves égés zajlik le (egy vagy több cellában, amely az akkumulátorból kitoró szűrőlággal, mérgező és gyúlékony gázok kibocsátásával és intenzív önfenntartó égéssel jár, melyet csak nagyon nehezen lehet megfékezni.

3. lépés: Döntés a megelőző fellépésről.

Akkumulátor cellák megfelelő szigetelése, védőburkolat fizikai behatások ellen. A védőburkolatok képesek gátolni/lelassítani a tűz terjedését, ugyanakkor nehezíthetik az oltási folyamatot, elrejtik a tűzforrást. Az akkumulátorrendszereket, modulokat és cellákat védeni kell a külső (elektromos) tűz ellen. Az akkumulátor konfigurációjától függően a cellatüzeket az egyes cellákra vagy az érintett modulokra kell korlátozni. Meg kell akadályozni, hogy az érintett modulon túl a hőfelfutás tovább terjedjen (másodlagos tüzek megelőzése).

A Siemens aspirációs füstérzékelővel (ASD) percekkel a hőfelfutás kialakulás előtt tudomást szerezhet a tűzveszélyről. A védelemre szoruló területről származó levegőmintát füst és elektrolitgáz jelenlétére folyamatosan értékeli az érzékelőkamrában.

4. lépés: Cselekvés.

A hűtés, mint oltóhatás, az egyik leghatékonyabb intézkedés az akkumulátorok tűzoltására. A környezet hűtése is mindenképpen elsődleges, hogy ne terjedjen tovább a tűz. Az egyik probléma az, hogy a megfelelő védőburkolat miatt gyakran nem lehet közvetlenül az akkumulátor tűzforrásához jutni. Tévhit a D

oltóanyaggal rendelkező hatékony beavatkozás, ezt semmilyen vizsgálat nem tudta igazolni.

Víz: Különböző nézetek vannak a víz oltóanyagként való felhasználásáról. Mivel a lítium nagyon reakcióképes, egyesek azt tanácsolják, hogy ne kerüljön vízzel érintkezésbe. A legújabb tanulmányok azonban azt mutatják, hogy nagyobb mennyiségű víz képes lítium tüzet megfékezni és hatékonyan leküzdeni őket (nagy mennyiségű vizet jellemzően csak a kiérkező tűzoltóság tud biztosítani, azonban ez időbe telik). Az itt adott magyarázat többek között a hűtőhatás, amely lelassítja a cellák reakcióját.

Gáz/aeroszol: A gázok használata jellemzően az oxidén kiszorítását célozzák az égéstérből (pl. a 3. lépésben említett nitrogén alkalmazása). Hasonlóan az aeroszolos megoldás is egy állandóan működő műszaki berendezés, amelyet a tűz lefojtására használnak, amíg a tűzoltóság meg nem érkezik a tűz végleges eloltására. Az oltó technológia az EN 15276-10 szabvány szerint működik víz hozzáadása nélkül. Amikor a hőmérséklet emelkedik, az oltógenerátor 4,5-15 másodpercen belül (modelltől függően) hatékonyan megszakítja a kémiai égési folyamatot. Ez a technológia környezetbarát és emberbarát (nem káros az egészségre, nem szorítja ki az oxigént), és többek között az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynökségénél (US EPA) hivatalos "HALON helyettesítő oltóanyagként" szerepel. Az alacsony súly/beépítési térfogatnak és a csövezetek nélküli szerkezetnek köszönhetően gyors és egyszerű telepítés lehetséges. A beruházási és járulékos költsége alacsony, mivel az aeroszolos oltó technológia nem igényel karbantartást és hosszú élettartamú.

Granulátum: Az oltógranulátumok szigetelik az akkumulátort. Az oltó- vagy szigetelő hatás azonnal aktív és teljesen önállóan működik. Az előfeltétel azonban az, hogy az elemeket elegendő granulátum vegye körül. A különleges PyroBubbles® oltógranulátummal fel lehet venni a küzdelmet a kezdődő tüzekkel szemben - a DIN EN 3-7 szerint tesztelte az MPA Dresden az A, B, D és F tűzosztályokhoz. A PyroBubbles® nagyrészt szilícium-oxidból áll, átlagos szemcsemérete 0,5-5 mm. Kb. 1050 °C hőmérsékleten kezd olvadni, és egy zárt hőszigetelő réteget képez a tűz forrása körül.

Gél: Az alacsony teljesítményű akkumulátorok (pl. elektromos kerékpár) esetében a hűtő és szakaszoló hatásra a zselészerű XGlue oltóanyag létezik, mely a víz hűtőhatását adja, de aktívan gátolja az égési folyamatot.

Hab: GLORIA WKL6P és WKL9P tűzoltókészülékek: 6 vagy 9 liter vízzel és Imprex C habanyaggal (2%, külön patronban) biztosítják a sikeres oltást.

A habok esetében még az AVD oltóanyag lehet megoldás, melyet a német BAVARIA Lithium X néven hoz forgalomba Európában. Az oltóanyag alapja a habosított vermikulit, melyet speciális szórással tudjuk felvinni az égő anyagra. Gyorsan elolvad és egy szilárd bevonattal állja útját az égésnek. A vermikulit azonban nem csak oltásra, hanem akkumulátorok szállításánál is kiváló védekezés.

5. lépés: Nyomon követés és felülvizsgálat.

BMS (Battery Management System) rendszer alkalmazása lehetővé teszi a cellák állapotának folyamatos nyomon követését, azonban ezek a rendszerek olykor nem működnek megfelelően, vagy meghibásodnak.

A tűz szinte minden esetben a használati, tárolási szabályok megsértése esetén következik be, nagyon fontos a dolgozók oktatása ismereteinek szélesítése a témában, mely egyben megelőző lépés is lehet.

2.4 Elektromos járművek tüzeseteinek vizsgálata

Megvizsgálva az elektromos járművek tüzeseteivel, hőmegfutasaival foglalkozó szakirodalmat, a leggyakoribb szituációk mikor cellatűz keletkezhet a következők: jármű töltési ciklus során, spontán cellazárlat (számos oka lehet: hőmérséklet, gyártási hiba), valamint a közúti baleset.

Amennyiben a kiváltó körülményeket vesszük alapul beszélhetünk termikus, mechanikai és elektrotechnikai hatásokról. Ha az konkrét kiváltó okokat akarjuk vizsgálni, abban az esetben egy elég hosszú listát is kaphatunk. Célzott termikus kiváltó ok lehet az extrém meleg és hideg, vagy akár ezek kombinációja egy hőszökkenet. Speciális formája lehet a nyílt láng, ami származhat a már begyulladt cellákból, vagy a jármű egyéb részeiből.

Mechanikai kiváltó ok lehet ütés (deformáló hatású), olyan sérülés mely felszakítja, átszúrja az akkumulátor cella külső borítását, de akár erős, hosszú ideig fennálló vibráció is lehet kiváltó ok.

Az elektrotechnikai hatások csoportját fel lehet bontani számos kiváltó okra. Ezek az okok, meghibásodások érinthetik a cellákat, de érinthetik a cellákat felügyelő elektronikákat (BMS) is. Történhet rövidzárlat, de egyéb hatásokkal együttesen (pl. termikus) a túltöltés és túlmerítés (pl. mély-, gyorskisütés) is eredményezhet tönkremenetelt [1, 6, 7, 8, 9].

A következő vizsgálati eljárások lettek kiválasztva az akkumulátor cellák tesztelésére:

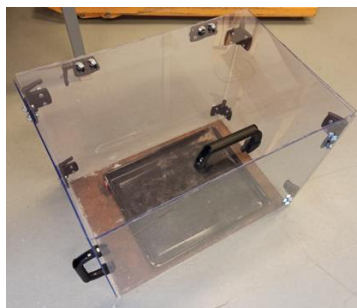
- nem megfelelő töltés,
- mechanikai sérülések (ütésvizsgálat),
- hőmérséklet hatásának vizsgálata.

Jelen cikk bemutatásáig csak a nem megfelelő töltési mechanizmust vizsgáló kísérletek elvégzésére került sor. Ekkor azt szimuláltuk a kísérletek során, hogy a BMS rendszer nem működik megfelelően.

3 Akkumulátor cellák túltöltése

3.1 Tesztekre való felkészülés

Biztonsági szempontokat szem előtt tartva egy tesztelő kamra építésére volt szükség, vagyonvédelem és a emberi sérülések elkerülése végett. A mobil kamra alap méreteit egy, az aláhelyezett 10 mm vastagságú acéllemez határozta meg amelyre egyrészt, a tesztelt cella rögzítése miatt másrészt, a cella magas égési hőmérséklet miatt volt szükség. Az oldalfalak és a tető a korábban is használt UV álló SAN lemezből készült (2. ábra). Ezeket zsanérokkal rögzítettük egymáshoz, amik biztosítják a könnyű nyithatóságot és a rugalmasságot is. A kamra részben nyitottra lett tervezve, egyrészt, hogy a robbanás során felszabaduló energia ne tegyen kárt benne másrészt, hogy ez az energia egy előre meghatározott irányba távozhasson, harmadrészt pedig a mérésekről videó, illetve termokameras felvételek készültek, és utóbbinak közvetlen rálátás szükséges a céltárgyra.



2. ábra

A mobil mérőkamra

A túltöltéses méréseket egy Sorensen DCS40-30E típusú labor tápegység segítségével végeztük. A tápegységet áramgenerátoros üzemben használva különböző töltő áramokat kapcsolunk a cellákra melyeknek töltés közben mértük a hőmérséklet változását.

A méréseknél LG INR 18650 MH1 GA274J017N1 típuszámú 3200 mAh kapacitású cellákat használtunk. Adatlapjuk szerint ezeknek a celláknak, a normál töltés esetén 1,5 A, míg gyors töltés esetén 3,2 A lehet a maximális töltőáramuk.

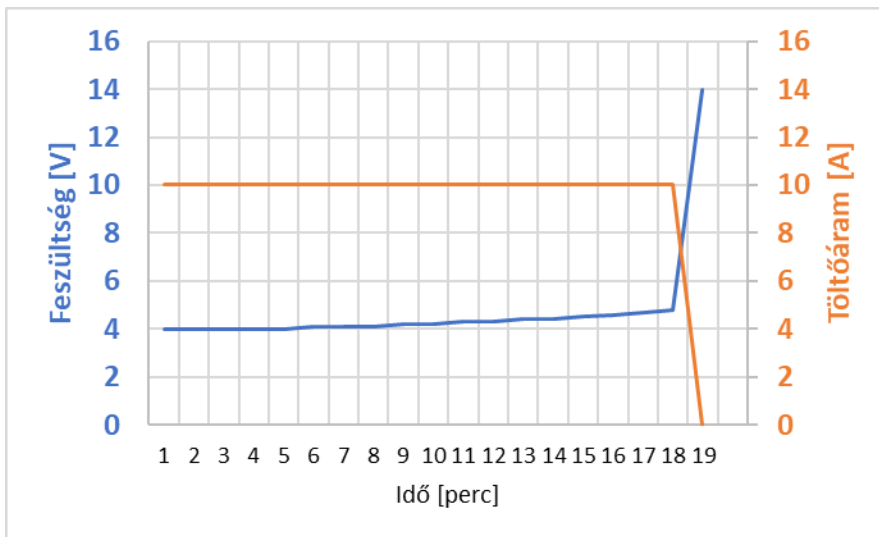
További méréseket végeztünk használt, bontott 18650-es Li-Ion cellákkal is referencia adatok gyűjtésének céljából.

3.2 Tesztek során tapasztalt jelenségek

3.2.1 Villamos paraméterek

A mérések során egy Sorensen DCS40-30E típusú labor tápegység segítségével végeztük. A tápegység áramgenerátorként szolgált, tehát az áramerősség lett állandó értékre beállítva, a feszültség igazodott a körülményekhez.

Általános tapasztalat volt, hogy a detonációk előtt a feszültség értéke hirtelen megszaladt, megnőtt. Ezzel egy időben az áramerősség lecsökkent mivel a cella megsemmisült, ezzel egy időben az áramkör is megszakadt (3. ábra).

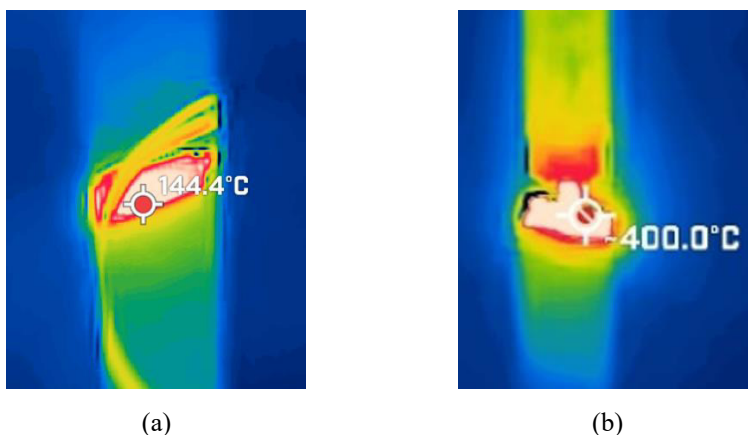


3. ábra
detonáció előtti hőmérsékletek

3.2.1 Egyéb jelenségek

A vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy mikor a töltőáram meghaladja a megengedett értéket az akkumulátorok hőmérséklete jelentősen megnő (4. a. ábra).

A kiegészítő minden esetben meghaladta a cella hőmérséklete a hőkamera méréstartományának felső határát (400 °C) (4. b. ábra). Tekintve, hogy az égés beindulásához 3 dolog szükséges: éghető anyag, oxigén és gyulladási hőmérséklet, 400°C felett számos anyag képes lángra kapni. A mérés során a mérődoboz biztosította, hogy a felrobbanó akkumulátor celláról az égés ne terjedjen tovább, azonban egy járműbe való beépítés után ez már szinte lehetetlen.



4. ábra

(a) Az akkumulátor cella hőmérséklete a detonáció előtti másodpercekben 30 A-es töltéskor; (b) egy túltöltés miatt kiégett (felrobbant) cella hőmérséklete.

3.3 Tesztek eredményeinek bemutatása

Mikor a töltőáram értéke 5 A volt, a maximális értéket 1,8 A-rel léptük túl. A mérés megnyugtató eredménnyel zárult, mivel 37 perc töltés után kioldott az akkumulátor cella PTC védelme 78,5 °C-os hőmérséklet elérésekor.

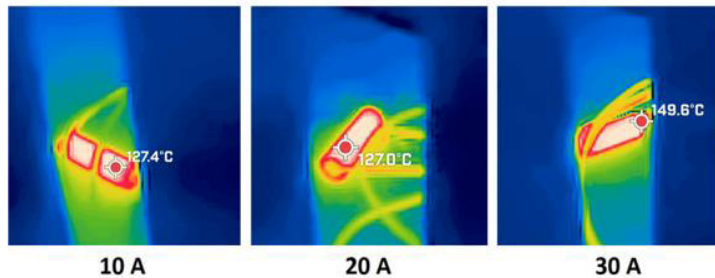
1. táblázat

Az újonnan beszerzett akkumulátor cellák stressztesztjének adatai

Töltő áram [A]	Max áram túllépés [A]	Töltési idő [perc]	Maximális cellahőmérséklet [°C]	Végeredmény
5	1,8	~ 37	78,5	PTC védelem kioldás
7,5	4,3	~ 26	116,3	Robbanás
10	6,8	~ 19	127,4	Robbanás
20	16,8	~ 5	137,8	Robbanás
30	26,8	~ 3	149,6	Robbanás

További vizsgálatok során, mikor a töltőáramot növeltük, minden esetben kiégett (felrobbant) az akkumulátor cella, tehát elmondható, hogy az estek 80%-ban kiégés lett a végeredmény. 7,5 A esetén 26 perc után 116,3 °C elérésekor következett be a detonáció. 10 A esetén 19 perc után 127,4 °C elérésekor következett be a detonáció. 20 A esetén 5 perc után 137,8 °C elérésekor

következett be a detonáció. 30 A esetén 3 perc után 149,6 °C elérésekor következett be a detonáció (5. ábra).



5. ábra

A detonáció előtti hőmérséklet értékek

A töltőáram növelésével csökkent a detonáció ereje, ami abból fakad, hogy 7,5 A esetén 26 perc alatt jóval több villamos energiát tudott elnyelni a cella kémiai energia formájában, mint 30 A esetén 3 perc alatt, így a több kémiai energia erőteljesebb detonációt eredményezett (6. ábra).



6. ábra

A detonációk

További méréseket végeztünk használt, bontott 18650-es Li-Ion cellákkal is. Ezeknél, ugyanolyan a töltőáramnál jóval rövidebb idő alatt akár 1-2 percen belül következettbe a detonáció, mivel az évek során töltéstároló képességük jelentős részét elveszítették. A használt cellák esetében is 80% volt a detonációval végződő tesztek részaránya (6. ábra).

Összefoglalás

A lítium akkumulátor cellák kutatását egy elektromos járműépítéssel kapcsolatos projekt és az Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék kutatási tevékenységei miatt kezdtük meg. Az akkumulátor cellák stressz tesztelésének elsődleges célja, azok megbízhatóságának tesztelése volt. Az eddig elvégzett tesztek kizárólag a töltés során felmerülő, túltöltést eredményező meghibásodás lett vizsgálva. A vizsgálatokhoz készítettünk egy tesztelő, védő dobozt, amire a tesztek veszélyessége okán volt szükség. Az eredmények azt mutatják, hogy a kiválasztott akkumulátor cellák jól ellen álltak a maximálisan megengedett töltőáram többszörös értékének is. Ugyanakkor az esetek döntő többségében a túltöltés kiégéssel, detonációval végződött.

Lehetséges folytatási irányvonal a mechanikai és termikus károsító hatásokat a vizsgáló stressztesztek elvégzése és adott esetben a körülmények kombinálása. Ezzel átfogó eredményt kapva a felhasználásra szánt akkumulátor cellák károsító hatásokkal szembeni próbabíráásával és megbízhatóságával kapcsolatban.

Köszönetnyilvánítás

„A KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS MINISZTERIUM ÚNKP-23-4 KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.”



Irodalomjegyzék

- [1] Sun, P., Bisschop, R., Niu, H. et al. A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. *Fire Technology* 56, 1361–1410 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>
- [2] Sungwook Kang, Minjae Kwon, Joung Yoon Choi, Sengkwan Choi Full-scale fire testing of battery electric vehicles, *Applied Energy*, Volume 332, 2023, 120497, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120497>
- [3] Lecocq, A., Bertana, M., Truchot, B., Marlair, G. Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle. In *International conference on fires in vehicles-FIVE*, 2012, Vol. 2, pp. 183-94.

-
- [4] Ü. Şenyürek , H. S. Soyhan and D. D. C. Çelik , "Battery Caused Fires in Electric Vehicles", Uluslararası Yakıtlar Yanma Ve Yangın Dergisi, vol. 10, no. 1, pp. 21-27, Dec. 2022, doi:10.52702/fce.1054263
- [5] Bisschop, R., Willstrand, O. & Rosengren, M. Handling Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Preventing and Recovering from Hazardous Events. *Fire Technol* 56, 2671–2694 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01038-1>
- [6] Marcel Held, Martin Tuchschnid, Markus Zennegg, Renato Figi, Claudia Schreiner, Lars Derek Mellert, Urs Welte, Michael Kompatscher, Michael Hermann, Léa Nacheff Thermal runaway and fire of electric vehicle lithium-ion battery and contamination of infrastructure facility, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 165, 2022, 112474, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112474>
- [7] Dongsheng Ren, Xuning Feng, Languang Lu, Xiangming He, Minggao Ouyang Overcharge behaviors and failure mechanism of lithium-ion batteries under different test conditions, *Applied Energy* Volume 250, 2019, pp. 323-332.
- [8] Ouyang, D., Chen, M., Liu, J., Wei, R., Weng, J., Wang, J. Investigation of a commercial lithium-ion battery under overcharge/over-discharge failure conditions. *RSC advances*, 2018, 8(58), 33414-33424. <https://doi.org/10.1039/C8RA05564E>
- [9] Feng, L., Jiang, L., Liu, J., Wang, Z., Wei, Z., Wang, Q.. Dynamic overcharge investigations of lithium ion batteries with different state of health. *Journal of Power Sources*, 2021, 507, 230262.