

**Passive crashworthiness systems for electric vehicles****Elektromos járművek passzív ütközésbiztonsági rendszerei**KERTÉSZ József<sup>1</sup> – KOVÁCS Tünde Anna<sup>2</sup>**Abstract**

In addition to daily usability, it offers sufficient travel range, fast battery charging time, comprehensive service infrastructure, reliability and high performance. These are important requirements that play a key role in consumer acceptance of electric vehicles. However, electric energy storage and high-voltage systems also pose a major challenge in terms of crash safety, and their additional weight can be compensated by reducing the body weight. Electric vehicles also achieve outstanding results in crash tests, thanks to more efficient crumple zones, but this requires new design solutions and new material combinations. Honeycomb structural designs, metal foam integration and the use of battery platforms as body panels are solutions to these design challenges. The aim of this study is to present these technical solutions, which are also used in today's modern vehicles, and to identify further development options.

**Keywords**

passive safety, metal foam, crashworthiness, electric vehicle, mass optimisation

**Absztrakt**

A napi használatra való alkalmasság mellett az elegendő utazási hatótávolság, a gyors akkumulátor töltési idő, átfogó szervizinfrastruktúra, megbízhatóság és nagy teljesítmény. Ezek azok a fontos követelmények, amelyek kulcsszerepet játszanak az elektromos járművek fogyasztói elfogadottságában. Azonban az elektromos energiatárolók és a magas feszültségű rendszerek is nagy kihívást jelentenek az ütközésbiztonság szempontjából, ráadásul ezek okozta többlettömeget a karosszéria önsúlyának csökkentésével kompenzálhatók. A méhsejt szerkezetes kialakítások, a fémhab integráció és az akkumulátor platformok karosszériaelemként való alkalmazása megoldást jelentenek ezekre a konstrukciós nehézségekre. A tanulmány célja ezeknek a technikai – a mai korszerű járművekben is alkalmazott – megoldásoknak a bemutatása és a további fejlesztési lehetőségek megfogalmazása.

**Kulcsszavak**

passzív biztonság, fémhab, ütközésbiztonság, elektromos jármű, tömegoptimalizáció

<sup>1</sup> kerteszk.jozsef@eng.unideb.hu | ORCID: 0000-0001-9544-3135 | PhD student, Óbuda University Doctoral School on Safety and Security Science | PhD hallgató, Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola | assistant lecturer, University of Debrecen Faculty of Engineering Air- and road Vehicle Department | tanársegéd, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Légi- és közúti Járművek Tanszék

<sup>2</sup> kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu | ORCID: 0000-0002-5867-5882 | associate professor, Óbuda University Bánki Donát Faculty of Mechanical and Safety Engineering | egyetemi docens, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

## BEVEZETÉS

Jelenleg a szigorú környezetvédelmi korlátozások miatt a járműipar a tiszta technológiákra összpontosít a lokális emissziómentes közlekedés érdekében [1]. És talán nem csak a környezetvédelmi korlátozások végett, hanem mert az emberiség talán ráébredni látszik arra a tényre, hogy a fenntartható jövő érdekében a hagyományos technológiákat el kell engedni, és új közlekedési módszert kell alkalmazni. Ebben az összefüggésben az elektromos (BEV) és hibrid (HEV) járművek ígéretes megoldásként jelentek meg a TTW (Tank to Wheel) energifolyam tekintetében, mivel működésük során zéró égéstermék kibocsátás érhető el [2-3]. Azonban 100%-osan emisszió mentesnek ezek a járművek sem tekinthetők, hiszen közlekedésük során továbbra is számolnunk kell a gumikopásából származó és a fékbetét elhasználódásából származó anyagleválással. Az elektrifikáció óriási léptékben fejlődik, azonban a legnagyobb korlátot az energia tárolása és az akkumulátorok viszonylag hosszabb idejű feltöltése jelenti. A jelenleg energiatárolóként alkalmazott LIB (Lithium-ion Battery) módszer tekinthető leghatékonyabb és költségoptimalizált megoldásnak, azonban biztonságtechnikai tekintetben szigorú intézkedéseket von maguk után az alkalmazásuk [4]. Ez azt jelenti, hogy a hagyományos járművek esetében alkalmazott passzív és aktív biztonsági rendszerek feladata már nem csak az utasok testi épségének megőrzése, hanem az energiatárolók és kiegészítő elemek hatékony védelme is. Az elektromos hajtáslánc elemei extrém módon növelhetik a járművek önsúlyát, amelyek energiahatékonyság és közlekedésbiztonság tekintetében is hátrányos. Ezért mai korszerű járművek karosszériájának tervezése kimondottan fontos és komplex feladat, hiszen a tömeg optimalizáció mellett az alacsony gyártási költségek, az újrahasznosíthatóság, a könnyű szerelhetőség igényeinek is meg kell felelni. A jármű karosszériáját úgy kell megalkotni, hogy az utasokat körülvevő cella olyan merev legyen, hogy ütközés esetén az semmilyen vagy csak minimális deformációt szenvedjen el. Ez viszont magával vonja azt a nehéz feladatot, hogy az ütközés energiáját kizárólag az utas cella előtt és mögött lévő gyűrődő zónának kell elnyelnie. Az elektromos-energiatárolók általában az utascella alatt helyezkednek el, így az előbb említett keret merevségének annak védelmére is ki kell terjednie [6].

## AZ ÜTKÖZÉS KINEMATIKÁJA

A ütközésbiztonság szempontból ütközésnek minősül minden olyan esemény, amelyben két vagy több jármű viszonylag rövid időn belül erőt fejt ki egymásra, ez a rövid ideig tartó kölcsönhatás, az érintett testek mozgásában változást idéz elő a közöttük fellépő belső erők hatására, sebességükben változás következik be. Ezek az ütközések a rendszer teljes kinetikus energiájának ütközés előtti és utáni változása szerint két csoportra osztható. Az ütközés előtti sebességkülönbség nagyságát zárási sebességnek nevezzük. Az ütközés típusától függetlenül minden esemény megőrzi a lendületet. A különböző típusú ütközéseket az különbözteti meg, hogy a rendszer mozgási energiája megmarad-e. Az ütközés során legközelebbi vagy érintkező felületek közös normáljával egy vonalban lévő vonalat ütközési vonalnak nevezzük. Ez az a vonal, amely mentén a belső ütközési erő hat az ütközés során, és a Newton-féle visszaállítási együttható ezen a vonalon van meghatározva [7]. Az ütközések lehetnek rugalmasok, ami azt jelenti, hogy a rendszer lendülete és mozgási energiája konstans, vagyis értékük az ütközést megelőző és az azt követő pillanatban azonos.

Az impulzus ( $I_1, I_2$ ) és mozgási energia ( $E_{kin.1}, E_{kin.2}$ ) megmaradása a következő egyenlettel fejezhető ki:

$$I_1 = m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = I_2 = m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2 \quad (1)$$

$$E_{kin.1} = m_1 \frac{v_1^2}{2} + m_2 \frac{v_2^2}{2} = E_{kin.2} = m_1 \frac{u_1^2}{2} + m_2 \frac{u_2^2}{2} \quad (2)$$

Ahol a  $v_1$  és  $v_2$  az ütközés megelőző pillanatbeli sebességek az  $u_1$  és  $u_2$  pedig az ütközés utáni sebesség értékek, mértékegységük m/s-ban kifejezve. Az  $m_1$  és  $m_2$  pedig a járművek tömegét jelentik kg-ban megadva.

Rugalmatlan ütközés esetén a rendszer lendülete továbbra is állandó, azonban mozgási energiájában változás következik be, annak értéke csökken vagy akár nullára redukálódhat. Az energia megmaradás törvény értelmében az ütközési energia átalakul, amely hő, hang és deformációs energiaként jelenik meg. Ezen energiák közül természetesen a deformációs energia hányad a legnagyobb mértékű.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2 = E_{imp} \quad (3)$$

$$E_{imp} = F \cdot s + E_{acu} + E_{heat} \quad (4)$$

$$F = m \cdot a_{x,y} \quad (5)$$

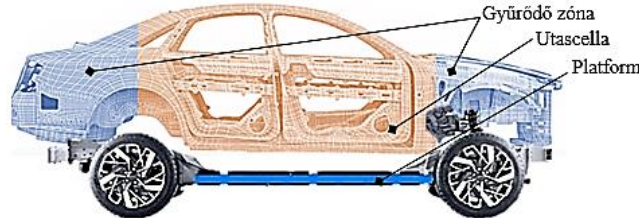
Az ütközés tényleges rugalmasságának vagy rugalmatlanságának mértékét a visszaállítási együtthatóval fejezhetjük ki. Ennek értéke nulla és egy között lehet, miszerint egy tökéletesen rugalmas ütközés visszaállítási együtthatója egy; a tökéletesen rugalmatlan ütközés visszaállítási együtthatója pedig nulla [8].

A jármű ütközés a rugalmatlan ütközések csoportjába sorolhatjuk, hiszen a rendszer mozgási energiájában változás következik be. A (2) képletet elemezve láthatjuk, hogy az ütközési energia, az akusztikus és hő energiák mellett deformációs munkaként jelenik meg, amely az ütközési erő és a gyűrődő zóna deformációjának szorzatával fejezhető ki. Amennyiben a gyűrődő zóna deformációjához szükséges energia kevesebb, mint a fellépő erőhatás, akkor a maradvány erő a járműben utazókra ható terhelésként fog megjelenni lassulás formájában. Ezek alapján egyértelműen kijelenthető, hogy a passzív biztonsági rendszer elsődleges célja a lehető legtöbb energia megkötése a gyűrődő zónában, és az ütközés időbeli lefolyásának megnövelése. Az (5) képlet alapján egyértelműen kijelenthető, hogy a tömegoptimalizáció nem csak az energiahatékonyt növeli, de pozitív hatással van az ütközési jellemzőkre.

## ELEKTROMOS JÁRMŰVEK ÜTKÖZÉSBIZTONSÁGI KONCEPCIÓJA

Az ütközésbiztonság azt határozza meg, hogy a járműszerkezet képes-e a személyeket érintő balesetben megfelelő védelmet nyújtani a testsérülések ellen, és megvédeni a rakományt az ütközés során bekövetkező sérülésekkel szemben. Az EV-k tervezése a hagyományos járműkonstrukción alapszik, azzal a különbséggel, hogy a hajtáslánc központi eleme a motor már nem a jármű orr vagy far részében helyezkedik el, hanem a futóművek tengelyvo-

nalában [1][9]. Ez nagyobb tervezési szabadságot ad a mérnököknek a gyűrődő zóna konstrukciója során. Az EV karosszéria biztonság alapú fejlesztése alapvetően több szekcióra különíthető el, hiszen a jármű szerkezete karosszériavázra és a platformra osztható. A platform magába foglalja az első hátsó futóművet, a hajtáselemeket és az akkumulátorokat. Szerkezeti szempontból a karosszériaváz pedig utascellára és gyűrődő zónára osztható. Ezt a szerkezeti felépítést szemlélteti a következő ábra.

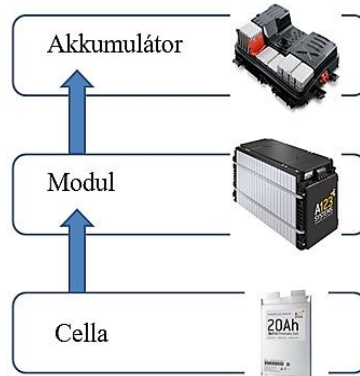


1. Ábra: Elektromos járművek szerkezeti felépítése (saját szerkesztés)

A korszerű járműgyártás a moduláris felépítésen alapszik. Vagyis a gyártók olyan platformokat használnak, amelyek nyomtávja, hasmagassága és tengelytávolsága szabadon módosítható. Ez lehetőséget ad arra, hogy egyetlen platformot több jármű modellben is alkalmazni tudják. Sőt bevált gyakorlati módszer, hogy különböző gyártók ugyan azt a platform típust használják, amelyet egy külső beszállítótól vásárolnak meg. Ez azonban nem jelenti azt, hogy a járművek ütközésbiztonsági fejlesztése csak az utascellára és a gyűrődő zónákra koncentrálódhat. Az energetikai és gyúlékony anyagok jelenléte további biztonsági problémát jelent, és megoldandó feladatokat von maga után [10-12]. Az akkumulátor deformációja rövidzárlatot eredményezhet egy vagy akár több cellán belül, amely hőt termel, ami meggyújthatja a benne lévő vegyi anyagokat. A keletkező láng áterjedhet a szomszédos cellákra és felrobban, ami viszont veszélyeztetheti a bent tartózkodókat. A problémát tovább súlyosbítja, hogy a fent részletezett kémiai jelenség nem feltétlen azonnal jelentkezik, a tüzeset kialakulása a baleset követő órák sőt napok múltán is létrejöhet. Ezért az elektromos járművek baleseti műszaki mentése a hagyományos járművekhez képest jelentősen eltér. Az előző fejezetben részletezett ütközés során keletkező energiát a gyűrődő zóna kell, hogy elnyelje, melynek mechanikai megoldása az erre a célra kialakított karosszéria elemek deformációja. Ahol a deformáció mértéke arányos az elnyelt energia mennyiségével. Ez azt jelenti, hogy a gyűrődő zónában a nagyfeszültségű elemek és vezetékek elhelyezését és védelmét úgy kell megoldani, hogy az áramütés veszélyét is kizárjuk a deformálódott karosszériaelemek ellenére is [1].

### Akkumulátor konstrukció

Az energiatároló rendszer az EV egyik legfontosabb eleme, és biztonsága kockázatot jelenthet az egész járműre nézve. A szigorúbb ütközésbiztonsági előírások miatt az autógyártók is elkezdtek egyre nagyobb figyelmet fordítani az energiatároló rendszerek önálló biztonságára az balesetet követő tűz és kémiai utóhatások végett. A Li-ion akkumulátorokat (LIB) széles körben alkalmazzák az EV meghajtásához használt elektromos energia tárolására. Cella fajták alapján három fő formát különböztethetünk meg, nevezetesen hengeres, tasakos és prizma alakúakat [13]. Jelenleg a gyártók jelentős része az akkucellákat modulokká egyesíti, ezen modulok együttese alkotja a komplett akkupakkot, amelyet aztán beépítenek a jármű platformjába. Ezt a felépítést szemlélteti a következő ábra.

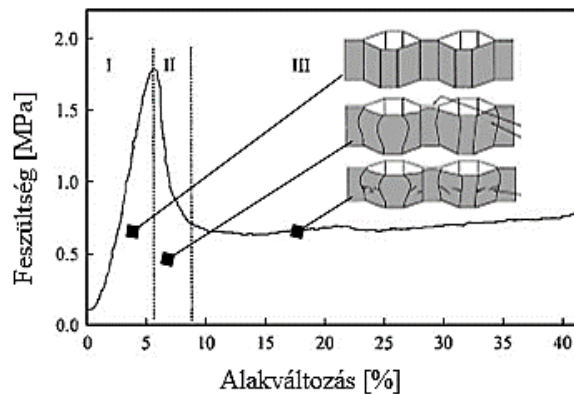


2. Ábra: Az energiatároló felépítése [14]

Az előző fejezetben részletezett utasejta merevségének ki kell terjednie az akkumulátorcsomag védelmére is. Ez nagyszilárdságú elemekkel valósítható meg, amely viszont energiahatékonyság szempontjából hátrányos többletsúlyt jelent a jármű össztömegére nézve. Ezért a járműgyártók olyan passzívbiztonsági konstrukciókon dolgoznak, amelyek az akkumulátorvédelem tekintetében nagy merevséggel rendelkeznek, nagy mennyiségű ütközési energia elnyelésére vagy elvezetésére alkalmasak és rendkívül alacsony tömeggel rendelkeznek.

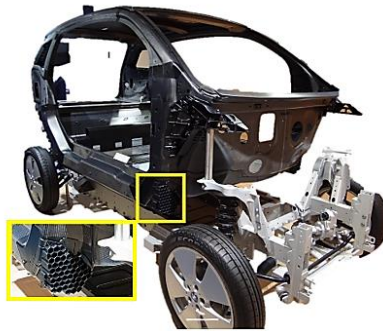
### Méhsejtszerkezet

A méhsejt szerkezet nagy szilárdság/tömeg arányuknak köszönhetően tökéletes anyag az energiaelnyelő alkalmazásokhoz. A szerkezet energiaelnyelésre való használatának másik előnye, hogy nagy területen képes elnyelni az erőket. Amikor az abszorber ütközik, a cellák zömölnek és egymásba hajtódnak. Az ehhez szükséges energia megegyezik az elnyelt energiával, így ez egy hatékony módszer a sérülések megelőzésére. Az energiaelnyelők előgyűrődéssel is alkalmazhatóak. Ilyenkor az méhsejt szerkezet első néhány milliméterét már összezúzták (harmonikázzák), és ezáltal csillapítják a kezdeti erőcsúcsot. A kezdeti erőcsúcs ugyan magas is lehet, de rövid ideig tart, majd a méhsejt elmozdításához szükséges erő gyorsan csökken, és az esemény során végig állandó szinten marad [15-16].



3. Ábra: Méhsejt szerkezet feszültség-alakváltozási diagram [17]

A szilárdság és tömegarány további fokozása érdekében a szerkezet alapanyagának könnyűfémeket, kompozitokat és szálerősítéssel műanyagokat használnak. Ütközés során deformációja segítségével az utascella és akkumulátor csomag igénybevétele jelentősen csökkenthető.



4. Ábra: Méhsejt-szerkezet gyakorlati alkalmazása [18]

### A vázszerkezet részét képező akkumulátor (IESS)

Megoldását a repülőgépipar inspirálta, ahol a repülők szárnyán belül nem alakítanak ki üzemanyagtartályokat, hanem maga a gép szárnya tölti be az üzemanyagtartály szerepét. Ezért a mérnökök lehetőséget látnak abban, hogy az elektromos autók következő generációjában, a modulokból álló akkumulátor csomag, mint önálló egység megszűnik és helyette az már a vázszerkezet részét fogja képezni, összekötve az alváz első és hátsó részét. A cellák pedig egy nagy egyéget alkotva fogják még tovább szilárdítani a platform szerkezeti integritását [19]. Új irányként jelent meg a járműiparban az öntőprés eljárás, amely a járműváz komplett hátsó és első részét képes egy darabként előállítani. A most ismertetett akkumulátor-vázelem ezt a két részt köti össze.



5. Ábra: Karosszéria elemek integrációja öntőprés eljárással [20]

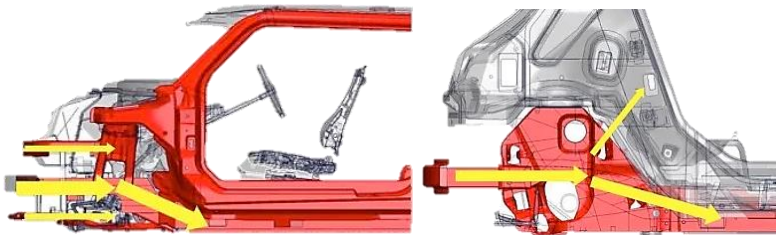
Az IESS (Integrated Energy Store System) vagyis az integrált energiatároló rendszer eljárásnak köszönhetően egyrészt csökken az alkatrészek mennyisége, alacsonyabb lesz az akkupakk önsúlya, valamint még tovább optimalizálható az elektromos járművek energiafelhasználása, így jelentős előrelépést jelent a hatótávolság növelésében is. Tesla még tovább javíthatja az energiafelhasználás hatékonyságát. Mivel az akkumulátor panel merevségét a már fent részletezett méhsejt szerkezet biztosítja, amely egyben helyet is ad az akkumulátor celláknak. Ezt hivatott bemutatni a következő ábra.



6. Ábra: Integrált energiátároló rendszer [20]

### CFRP utascella

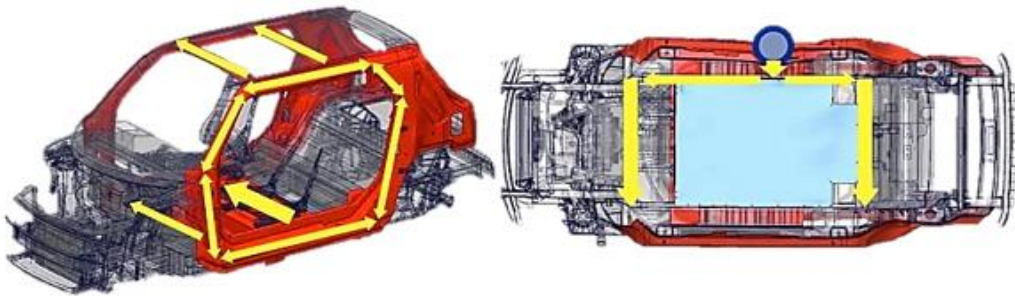
A CFRP (Carbon-Fiber Reinforced Polymer) szálerősítéses műanyagok merevségi mutatója azok önsúlyához viszonyítva kiemelkedő. Ezáltal megfelelő alakprofil létrehozásával alkalmasak utascella kialakításra, amely a versenysportban, mint pl. a F1 esetében egy régóta alkalmazott és bevált módszer. A nagy szilárdságú szénszálaz utastér ütközés során deformációmentes marad, és ezáltal az ajtók is nyithatók maradnak, amely egy jól működő passzív biztonsági rendszer esetében alapkövetelmény. A CFRP száraz, gyantamentes állapotban szövetszerű, így nagyon könnyen alakítható. Kellő merevségét a rácsba befecskendezett gyanta megszilárdulása után éri el. Ez lehetőséget ad arra, hogy a szálak inhomogén elrendezésével és átfedésével az alkatrész több különböző irányú terheléssel szemben is megerősíthető [21]. Ily módon az alkatrészek a hagyományos anyagokhoz képest lényegesen tömegoptimalizált és hatékonyabb. A hétköznapi járművek esetében még mindig a fémalapú utascella alkalmazása az elterjedt, viszont az akkumulátorok okozta többletsúly miatt egyre nagyobb teret kezd hódítani a CFRP melynek elsődleges célja a tömegoptimalizáció [22]. A fejlett töréscsatlaknak és végeselemes szimulációknak köszönhetően nem csak alapanyagában, hanem szerkezetében is jelentős előre lépések figyelhetők meg. Erre kitűnő példa, hogy néhány CFRP kabin B-oszlop nélkül is képes a baleset során szükséges merevséget biztosítani. A hatékonyság háttérében a kiválóan megtervezett energia disztribúció áll. Energia hatékonyság érdekében az autógyártók gyakran terveznek kompakt járműveket, amelyek klaszszikus értelemben vett gyűrődő zónákkal nem rendelkeznek. Ez azt jelenti, hogy frontális vagy akár ráfutásos ütközés során fellépő erőhatást a jármű mentén végig kell vezetni. Erre a célra gyakran igénybe veszik az adott jármű hajtás platformját is. Ezt mutatja be a következő ábra.



7. Ábra: Ütközési energia terjedése [23]

Az oldalirányú ütközés az, ahol a legtöbb aggodalomra adhat okot a B-oszlop mentes utascella. Az Euro NCAP (New Car Assessment Programme) oldalsó ütközési tesztje során a jármű oldalát 32 km/h sebességgel egy oszlopnak vezetik, amely során a cella deformációját és az ajtó energiacsillapító hatását vizsgálják. A CFRP utascella minimális deformációval

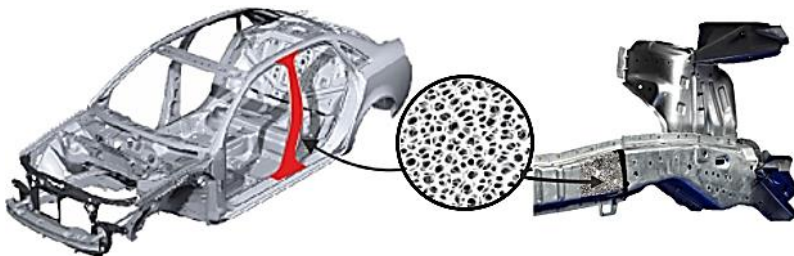
képes elviselni ezt az oldalirányú terhelést. Ez viszont az utasokra nézve jelentős oldalgyorsulást von maga után mint terhelés. Ennek mértéke a küszöbön lévő méhsejt szerkezet alkalmazásával csökkenthető, és az energia egyrésze a platform irányába továbbítható [23].



8. Ábra: Energia disztribúció oldalütközés esetén [23]

### Fémhab integráció

A gyűrődő zónák elemei általában vékonyfalú szelvények, amelyek alaksajátosságuknak és kitüntetett helyen való kikönyvitésüknek köszönhetően egy előre leírható deformációt szenvednek el az ütközés során. A deformációhoz szükséges energia az ütközést megelőző pillanatbeli mozgási energiából származik. Egyfajta energia konvertálás zajlik le hang, hőfejlődés és deformáció jelenlétében. Az elnyelt energia mennyisége konstrukciós szempontból több módon is fokozható. A második fejezetben levezetett összefüggések alapján a deformáció ( $s$ ) vagyis a gyűrődő alkatrész a jármű hosszirányú tengelyéhez viszonyított méretének növelésével az utasokat terhelő erőhatás csökkenthető. Ennek viszont a helyszükséglet, a kompakt jármű szemlélet és a többletsúly szab jelentős határokat. A programozott deformációra tervezett alkatrészek falvastagságának növelésével a gyűrődéshez szükséges energiaigényt növeljük, ezáltal több energiát köthetünk le az ütközés során. Ez azonban jelentős többletsúlyt von maga után, illetve a kezdeti erőcsúcsok negatívan hathatnak a lassulás mértékére. Ez azt jelenti, hogy az alacsonyabb energiájú ütközések esetén a nagyobb falvastagságú vékonyfalú szelvény nem szenved el deformációt, sőt még az energia utascella felé való vezetésében is szerepet játszik. Ezek a korlátok a korábbi konstrukciók újragondolásával és úgy anyagok alkalmazásával léphetők át. Ennek egyik eszköze a fémhab integráció, ahol a korábbi vékonyfalú szelvényeket porózus szerkezetű anyagokkal, fémhabokkal töltjük meg.

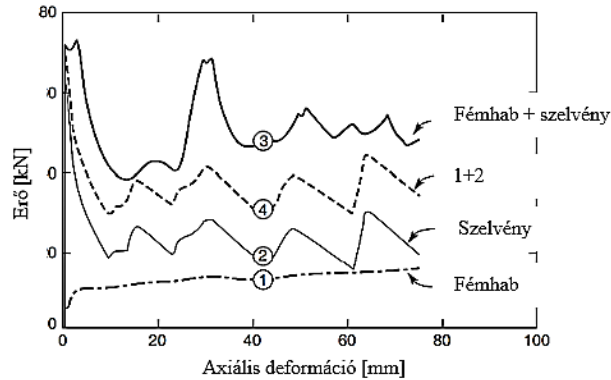


9. Ábra: Fémhabok alkalmazási lehetőségei [24]

Fémhabok jellemző tulajdonsága, hogy a lineáris rugalmasságot követően a méhsejt szerkezethez hasonlóan állandó feszültség érték mellett képes deformállódni a belső cellák



teljes zömülési állapotáig. Ezzel jelentősen növelhető a szerkezet energia abszorpciós képessége. Alkalmazásának pozitív hatását mutatja a következő ábrán látható diagram. Megfigyelhető, hogy a szelvény és a hab önálló zömítése során elnyelt energia matematikai összege nem egyenlő az integrált szerkezetével. A fémhabbal töltött vékonyfalú cső által elnyelt energia mennyisége jelentősen meghaladta a matematikailag összegzett energiát [25].



10. Ábra: A fémhab alkalmazásának pozitív hatása [25]

Ezeknél a szerkezeteknél működés tekintetében fontos megemlíteni, hogy az energia jelentős részét minden esetben a vékonyfalú szelvény fogja felvenni, annak teljesítményét és mechanikai paramétereit a hab, mint a fémekben alkalmazott ötvöző csak javítja. Ez azt is jelenti, hogy bár a hab alacsonyabb energiájú ütközéseknél már deformálódna és ezzel energiát kötne meg, az nem tud működni amíg az ütközési energia el nem éri a cső deformációjához szükséges szintet. Ahhoz, hogy már alacsony sebességű ütközések esetén is képes legyen a passzív biztonsági berendezés energia abszorpcióra a lökhárító és nyúlvány szerkezetek konstrukciós újragondolása szükséges.

A fémhabok szabad zömítése egy-tengelyű feszültségállapotnak tekinthető. Ha a hab deformációja radiálisan gátolt annak zömítése során, akkor a többtengelyű feszültségállapotnak köszönhetően az elnyelt energia mennyisége jelentősen növelhető, fokozva ezzel a gyűrődő zóna hatékonyságát.

## KONKLÚZIÓ ÉS ÖSSZEGZÉS

Az elektromos járművek egyre nagyobb teret hódítanak a közlekedésben, hatékonyságukat a hétköznapi használatukkal igazolhatjuk. A fenntartható jövő érdekében szükséges a belsőégésű motorokra alternatívát találni, és erre jelenleg az elektromos hajtáslánc alkalmazása tűnik a legkézenfekvőbbnek. Az EV-k technikája kiforrott, gyorsabb ütemű terjedésüknek egyelőre az energiatárolás problémája szab határokat. Bár az első modellekhez képest a mai példányok már jelentős hatótávval és töltési kapacitással rendelkeznek, ezek a paraméterek viszont általában az önsúly növelését vonják maguk után. Az elektromos modelleken végzett töréstanulmányok gyakran kiváló minősítésről számolnak be. Ennek háttérében a jármű konstrukciós optimalizálása áll. Az első és hátsó gyűrődő zónák konstrukciós szempontból szabadban formálhatók, hiszen a hajtáslánc a karosszéria alatt, a tengelyek vonalában helyezkedik el. Így a gyűrődő zóna nagyobb és hatékonyabb deformációra képes, több ütközési ener-

giát elnyelve ez által. Ütközésbiztonság szempontól az energiatárolók kiemelt figyelmet kapnak a járművek passzív biztonsági rendszereinek fejlesztése során. A differenciált szilárdságú karosszéria rendszert úgy kell megalkotni, hogy az utascella és az az alatt lévő energia tárolót körülvevő keret ne deformálódjon egy esetleges ütközés során. A differenciált szilárdság azt jelenti, hogy teherviselés szempontjából az utastér túlméretezett, tehát frontális ütközéskor a motortér és a csomagtér gyűrődése emészti fel a mechanikai energiát, és az utastér sértetlen marad. A túlméretezés történhez nagyobb falvastagságú elemek alkalmazásával és alak optimalizációval is. Előbbi azonban jelentősen növelné a jármű önsúlyát csökkentve ezzel a energiahatékonyságot és rontva az ütközési paramétereket a balesetben résztvevő másik jármű tekintetében. Ezért a járműgyártók szálerezősítéses műanyagokat, könnyűfémeket és más egyéb kompozitokat alkalmaznak a tömegoptimalizáció érdekében. Ezek viszont a gyűrődő zónák konstrukciós fejlesztését vonják maguk után, hiszen az utascella deformációmentes követelménye miatt az energiát sokkal hatékonyabban kell elnyelni ezeknek a rendszereknek. A méhsejt szerkezetes kialakítások, a fémhab integráció és az akkumulátor platformok karosszériaelemként való alkalmazása megoldást jelentenek ezekre a konstrukciós nehézségekre. Hatékonyságukat pedig a töréstan eredményei igazolják.043 482 553

### FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Victor Chombo, Pius, Yossapong Laonual, and Somchai Wongwises. "Lessons from the electric vehicle crashworthiness leading to battery fire." *Energies* 14.16 (2021): 4802.
- [2] Kumar, Dileep, Vasu Jain, and Ramprasad Potluri. "Energy Efficiency of Battery Electric Vehicles with In-Wheel Motors." *SAE International Journal of Sustainable Transportation, Energy, Environment, & Policy* 4.13-04-01-0002 (2022).
- [3] Rodrigues, João Pedro Da Silva, et al. "Comparison of Well-to-Wheel energy efficiency between combustion vehicles and electric vehicles." 2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET). IEEE, 2022.
- [4] Espedal, Ingvild B., et al. "Current trends for state-of-charge (SoC) estimation in lithium-ion battery electric vehicles." *Energies* 14.11 (2021): 3284.
- [5] J. Arrillaga and B. Giessner, "Limitation of short-circuit levels by means of HVDC links," presented at the IEEE Summer Power Meeting, Los Angeles, CA, USA, Jul. 12–17, 1990, Paper 70 CP 637.
- [6] Zhang, Junyuan, et al. "Topology optimization for crashworthiness and structural design of a battery electric vehicle." *International journal of crashworthiness* 26.6 (2021): 651-660.
- [7] Jones, Andrew Zimmerman. "The Physics of a Car Collision." ThoughtCo, Aug. 27, 2020, [thoughtco.com/what-is-the-physics-of-a-car-collision-2698920](https://www.thoughtco.com/what-is-the-physics-of-a-car-collision-2698920).
- [8] isaac Physics - [https://isaacphysics.org/concepts/cp\\_collisions?stage=all](https://isaacphysics.org/concepts/cp_collisions?stage=all), 2022.11.15.
- [9] Stabile, Pietro, et al. "An ultra-efficient lightweight electric vehicle—Power demand analysis to enable lightweight construction." *Energies* 14.3 (2021): 766.
- [10] Aalund, Ryan, et al. "Understanding the non-collision related battery safety risks in electric vehicles a case study in electric vehicle recalls and the LG chem battery." *IEEE Access* (2021).
- [11] Brandt, Jonas, and Artur Storm. "Fire safety of battery-electric vehicles." *Book of Abstracts*. 2022.

- [12] Un, C., and K. Aydin. "Thermal runaway and fire suppression for electric vehicle batteries."
- [13] Zhang, Xinghui, et al. "A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles." *Energy* 238 (2022): 121652.
- [14] Mohammed Sayed Mohammed Farag - Lithium-Ion Batteries: Modelling and State of Charge Estimation, Thesis for: Master of Science, 2013.
- [15] Bang, Seung-Ok, et al. "Study on compression tests of aluminum foam and honeycomb sandwich composites." *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation society* 12.9 (2011): 3802-3807.
- [16] Ivanez, Ines, Lorena M. Fernandez-Cañadas, and Sonia Sanchez-Saez. "Compressive deformation and energy-absorption capability of aluminium honeycomb core." *Composite Structures* 174 (2017): 123-133.
- [17] Lee, Hyo S., et al. "Mechanical behavior and failure process during compressive and shear deformation of honeycomb composite at elevated temperatures." *Journal of Materials Science* 37.6 (2002): 1265-1272.
- [18] Autotechnika - <https://autotechnika.hu/cikkek/karosszeria/10821/ha-a-szenszalas-karosszeria-toerik>, 2022.11.15.
- [19] InsideEVs - <https://insideevs.com/news/482175/tesla-4680-battery-pack-revealed-analyzed/> 2022.11.15.
- [20] Naor, Michael. "Tesla's Circular Economy Strategy to Recycle, Reduce, Reuse, Repurpose and Recover Batteries." *Recycling-Recent Advances*. IntechOpen, 2022.
- [21] Gupta, Manoj Kumar, and Vishesh Singhal. "Review on materials for making lightweight vehicles." *Materials Today: Proceedings* 56 (2022): 868-872.
- [22] Schnöll, Hans Peter, et al. "CO2 Reduction Potential of CFRP-Bodywork Concepts considering Production and In-Use Phase." *Proceedings of the International Conference Management of Technology-Step to Sustainable Production*, Brela. 2015.
- [23] Lukaszewicz, Dirk H-JA. "Automotive composite structures for crashworthiness." *Advanced composite materials for automotive applications: structural integrity and crashworthiness* (2013): 99-127.
- [24] ENGINEERING - DESIGN AND TECHNOLOGY - [https://www.technologystudent.com/joints\\_flash/metalfoam2.html](https://www.technologystudent.com/joints_flash/metalfoam2.html) 2022.11.17.
- [25] Ashby, M. F., Evans, T., Fleck, N. A., Hutchinson, J. W., Wadley, H. N. G., Gibson, L. J. 2000. *Metal foams: a design guide*. Elsevier.