

**OPTIMIZED MULTI-STAGE CRASHBOX
STRUCTURE FOR LOW SPEED
COLLISION****ALACSONY ÜTKÖZÉSI SEBESSÉGRE
OPTIMALIZÁLT TÖBBTAGÚ
CRASHBOX SZERKEZET**KERTÉSZ József¹ – KOVÁCS Tünde Anna²**Abstract**

One of the most common collisions is the head-on collision, which occurs mainly on congested inner-city and access roads. These are mostly low-speed collisions, but can cause personal injuries to vehicle occupants that can lead to long-term health damage, such as whiplash injuries. More efficient impact energy absorption can improve the safety of vehicle occupants. This paper presents the design and application potential of an optimised multi-member crashbox for use in bumper systems and underrun protection systems. The structure is integrated with an absorber filler (e.g. metal foam) and is suitable for deformation transmission. Thanks to the multi-member design, the peak crushing force typical of conventional thin-walled structures can be significantly reduced, allowing energy absorption to start sooner by the crashbox structure.

Keywords

crashbox, bumper system, metal foam, absorption, crashworthiness

Absztrakt

Az egyik leggyakoribb ütközés a ráfutásos baleset, amely elsősorban a zsúfolt belvárosi és bevezető szakaszokon történik. Ezek legtöbbször alacsony sebességű ütközések, viszont olyan személyi sérüléseket is okozhat a járműben utazókban, hogy azok akár hosszútávú egészségkárosodáshoz is vezethetnek. Hatékonyabb ütközési energia abszorpcióval növelhetjük a járműben utazók biztonságát. Jelen tanulmány egy olyan lökhárító rendszerekben és aláfutásgátló rendszerekben alkalmazható optimalizált többtagú crashbox (gyűrődő elem) konstrukcióját és alkalmazási lehetőségét mutatja be. A konstrukció abszorber töltettel (pl. fémhab) integrált, és deformációs áttétel megvalósítására alkalmas. A több tagú kialakításnak köszönhetően a hagyományos vékonyfalú szerkezetekre jellemző gyűrődési csúcserő jelentősen csökkenthető, így az energia abszorpció hamarabb elkezdődhet a crashbox szerkezet által.

Kulcsszavak

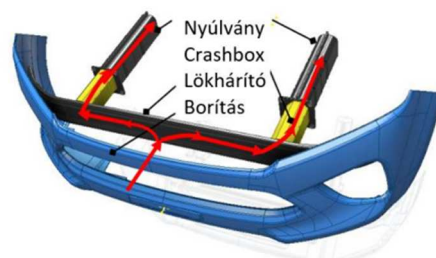
crashbox, lökhárító rendszer, fémhab, abszorpció, ütközésbiztonság

¹ kertesj.jozsef@eng.unideb.hu | ORCID: 0000-0001-9544-3135 | Ph.D. student, Óbuda University Doctoral School on Safety and Security Science | Ph.D. hallgató, Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola

² 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

8 km/h és 16 km/h közötti ütközési sebesség tartományában a jármű elejére és hátuljára szerelt lökhárító felel az ütközési energia abszorpcióért. Nemzetközi előírásoknak megfelelően ebben a tartományban a jármű fő részegységei mint pl. az alváz (nyúlvány) nem sérülhetnek [1-5]. Ez azt jelenti, hogy az energia abszorpció jelentős részét a lökhárító rendszer részét képező crashbox szerkezetnek kell megoldania. A lökhárító rendszer könnyen, oldható kötésekkel szerelt és cserélhető passzív biztonsági konstrukció, melyek nagymértékben gyorsítják a káresemény utáni javítást és a javítási költségek alacsonyabban tartathatók [6-8]. A lökhárító rendszer három fő részre különíthető el: kereszttartó, crashbox szerkezet és felfogatás. Ezek közül az energia abszorpció tekintetében kiemelt fontosságú a crashbox. A crashbox egy vékonyfalú szerkezetnek tekinthető konstrukció, amely alak és méret sajátosságainak köszönhetően programozható gyűrődési jellemzőkkel bír [9-11]. Az 1. ábra a lökhárító rendszer elemeit mutatja.



1. Ábra: Lökhárító rendszer felépítése [Saját szerkesztés]

A crashbox által elnyelt energia függ a szerkezet falvastagságától, keresztmetszeti jellemzőitől és az alkalmazott anyag mechanikai és szilárdságtani jellemzőitől [12-14]. Természetesen az energia elnyelő képesség fokozható a falvastagság növelésével, viszont a passzív biztonsági rendszerek fejlesztése során, ha nem is primer, de fontos szempont a tömegoptimalizáció is. A crashbox szerkezetek gyűrődési jellemzőiről általánosan megfogalmazható, hogy a lineárisan rugalmas szakasz, egy csúcserőt (folyási értéket) elérve nagy mértékű erő fluktuáció mellett harmonika elven zömöl, a teljes roncsolódásig [15-16]. A szerkezet zömítéséhez szükséges energia megegyezik a káreseményben felemésztett energiával.

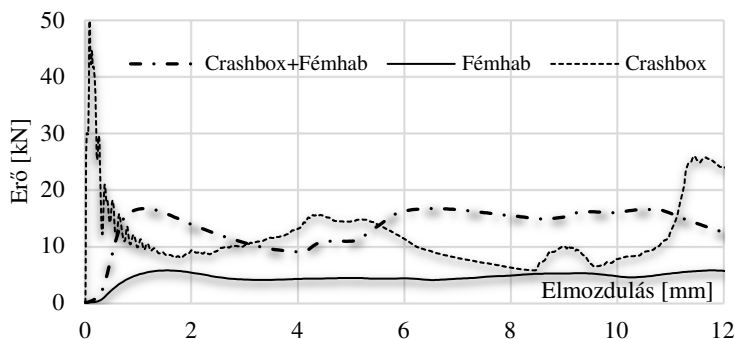
VIZSGÁLATI MÓDSZER

A következőkben bemutatott megoldás egyszerűsített változata (próbadarab) elkészítése és mérése anyagvizsgálati laborban történt. A zömítési vizsgálatot Instron 8801 szervo-hidraulikus anyagvizsgáló gépen végeztem el, ahol vizsgáltam az elnyelt energia mennyiséget és a gyűrődés során jelentkező erőviszonyokat. A megoldást többféle variációban szereltük össze és került lemérésre, hogy a szerkezet működéséről és annak jószágáról információt kapjunk, valamint, hogy a kutatás kezdetén megfogalmazott hipotézist igazolni tudjuk, igazolják. Minden konstrukció változatot többször mértük le, hogy a kapott értékek validálhatók legyenek. A vizsgálatokat 1mm/s-al végeztük, és az erőmérő cellák védelmében 100kN-s erő maximumban limitáltuk. A szerkezetek gyűrődésük során elnyelt

energia meghatározásához az gyűrődési erőt rögzítettük az elmozdulás függvényében 100 Hz mintavételi frekvencia mellett.

FÉM HAB, MINT ENERGIA ABSZORBER

Léteznek olyan anyagok, melyek szerkezeti sajátosságaiknak köszönhetően ideális energiaelnyelőknek tekinthetők. Ilyenek pl. a porózus szerkezetű fémek, kompozitok, úgynevezett fémhabok. Porozitásuk függvényében a lineáris elasztikus szakaszt egy egyenletes energia elnyelési zóna, az úgynevezett plató szakasz(közel állandó erő melletti deformáció) követ, amely az energia abszorpció szempontjából kiemelten fontos annak egyenletessége miatt [17-19]. A crashbox pl. fémhab tömbökkel helyettesíthető lenne, azonban a szabad zömítéshez képest nagyságrendileg 30%-al több energiát képest megköti, ha deformációja radiálisan gátolva van[20-23]. Ezért gyakran alkalmazott megoldás a zártcellás fémhabokkal integrált crashbox szerkezet, vagyis a fémhabbal töltött crashbox. Gyűrődése során nem csak a crashbox szerkezet folyamatos roncsolódása, de a benne lévő fémhab zömítése is energiát emészt fel, ezzel növelve a konstrukció energia elnyelő képességét[24]. Az elnyelt energia mennyisége ugyan fokozható fémhab integrációval, azonban az alkalmazott abszorber előnyös gyűrődési jellemzőit – mint pl. plató szakasz - elveszítjük, mivel az elsődleges teherviselő a vékonyfalú szerkezet. A vékonyfalú szerkezet törése egy csúcserővel indul, majd jelentős erő fluktuáció mellett folytatódik a zömülése egészen a felkeményedésig[25-26]. Ez a hátrányos erő fluktuáció figyelhető meg a 2. ábrán, ahol azt láthatjuk, hogyan alakulnak az energia görbék önálló hab zömítés és a crashbox-al együttes zömülés esetén.



2. Ábra: Gyűrődési karakterisztika különböző energia elnyelő konstrukció esetén [Saját szerkesztés]

A FEJLESZTETT KONSTRUKCIÓ MŰKÖDÉSI ELVE

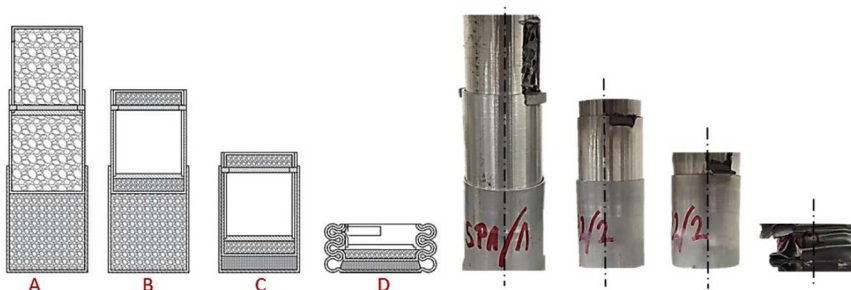
Az optimalizált, abszorberrel (lattice szerkezet, fémhabok, kompozitok) integrált crashbox szerkezet több elemből tevődik össze, ennek köszönhetően az alkalmazott abszorber és a vékonyfalú szerkezet zömülése a törés során elkülöníthető, ezáltal egy modulálható energia elnyelőt kapunk. Mivel az abszorber a crashbox-on belül kerül zömítésre, annak deformációja radiálisan gátolt többtengelyű feszültség állapotnak tekinthető. A crashbox gyűrődése során először a benne található abszorber zömül, majd annak teljes deformációját elérve megkezdődhet a vékonyfalú szerkezet gyűrődése, melynek jellemzőit a gyakorlatban már alkalmazott és ismert alak- és méret optimalizációval befolyásolhatunk, amely a talál-

mány működése szempontjából nem releváns. A szerkezet lehetőséget ad különböző sűrűségű, típusú abszorberek egyidejű és elkülöníthető zömítésére is. A különböző típusú/sűrűségű abszorberek alkalmazásának gyakorlati jelentősége, hogy a nagyobb sűrűségű abszorber csak nagyobb energiájú ütközések esetén lép működésbe. A különböző típusú és abszorpciós képességű abszorbereknek köszönhetően modulálható a crashbox szerkezet és az aktuális jármű tömegéhez és jellegéhez igazíthatjuk. (Nagyobb tömegű jármű, nagyobb mozgási energiát eredményez, vagyis nagyobb energia megkötésre alkalmas abszorber szükséges.) Részleges zömülése mellett elegendő csak az abszorber cseréje, nem szükséges a teljes szerkezetet cserélni/ javítani. Az abszorberek által elnyelt energia arányos azok deformációjával. Ez azt jelenti, hogy egységnyi gyűrődéshez egységnyi abszorber zömülés tartozik a hagyományos, korábban alkalmazott crashbox szerkezetek esetében. Az optimalizált crashbox azonban többtagú teleszkóp szerkezetként működik, ez pedig lehetőséget ad arra, hogy egységnyi gyűrődéssel a konstrukción belül kétszeres zömülést hozzunk létre az abszorberre vonatkozóan növelve ezzel az elnyelt energia mennyiségét, vagyis a jármű lassulása és ezáltal a káresemény következményei csökkenthetők. Az ütközésbiztonságra vonatkozó nemzetközi előírások értelmében átlagosan 8km/h-s ütközési sebességig a jármű nem szenvedhet jelentősebb deformációt. (A felületi karcolásoktól, műanyag elemek repedésétől eltekintve.) Ez a követelmény jelen megoldásban a tagok egymáshoz viszonyított szilárd/átmeneti illesztésével esetleg ragasztásával oldható meg. A szilárd illesztésnek köszönhetően a tagok egymáson való elmozdulása során a köztük ébredő súrlódás is növeli az elnyelt energia mennyiségét. Jelen megoldás alapján két fő konstrukciót fejlesztettünk, adott konstrukción belül pedig kétféle változatot dolgoztunk ki. Azonban mind a négy a következőkben bemutatott szerkezet működési elve azonos, vagyis modulálhatók, és a deformáció áttételezés elvén működnek.

Konstrukció működés

A fent részletezett megoldás alapján két fő konstrukció született. Adott konstrukción belül pedig kétféle változatot dolgoztunk ki. Azonban mind a négy bemutatott szerkezet működési elve azonos, vagyis modulálhatók, és a deformáció áttételezés elvén működnek.

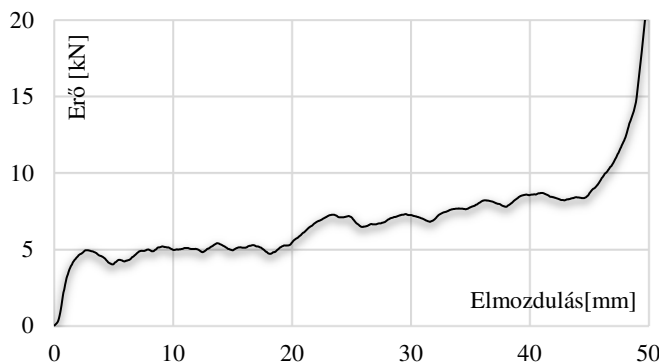
A fejlesztett konstrukció működését a 3.ábra mutatja be, amely 2D nézetben és a validálás során készített fényképeken keresztül is megfigyelhető. A technikai rajzon a ritkább sraffozás alacsonyabb sűrűségű, a sűrűbb sraffozás pedig a nagyobb sűrűségű/teljesítményű abszorbert jelképezi.



3. Ábra: a 1.sz. konstrukció gyűrődési lépései (eltérő abszorberek esetén) [Saját szerkesztés]

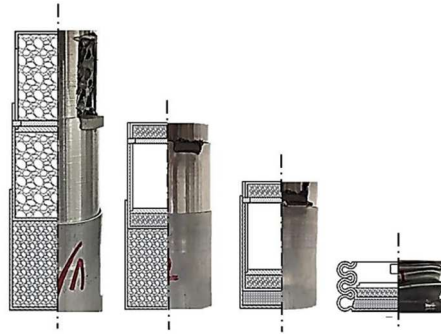
Az alapfázis (A) esetén a felső két tagban alacsonyabb sűrűségű/teljesítményű abszorber, az alsó tagban nagyobb sűrűségű/teljesítményű abszorber található. Az abszorber töltet fajtája nem rögzített, az lehet fémhab, kompozit vagy akár lattice szerkezet, esetleg ezek együttese. A részleges gyűrődés fázisban (B) az alacsonyabb sűrűségű/teljesítményű abszorberek zömülése történik. A teleszkóp szerkezet révén és a konstrukció kialakítása miatt egységnyi crashbox hosszváltozáshoz kétszeres abszorber zömülés tartozik. Ennek részletezése egy későbbi fejezetben olvasható. Ezen fázis végéig a szerkezet szétszerelhető és felújítható marad, az abszorber cserélhető. A részleges gyűrődési fázist a C-zömülési fázis követi, amikor is a „B” szakasz végén a felső abszorberek elérték a teljes zömült állapotot, megkezdődik a nagyobb sűrűségű/teljesítményű abszorber zömülése.

Az alacsonyabb sűrűségű abszorber felkeményedése egybe esik a nagyobb sűrűségű/teljesítményű abszorber lineáris elasztikus szakaszával. Ezt a jelenséget a fejlesztés részeként végzett fémhab zömítési vizsgálataink is igazolják, ahol különböző sűrűségű alumínium habból készült próbatesteket egymásra helyezve vetettük alá terhelésnek. Az így kapott diagramot az 4. ábra mutatja, ahol jól megfigyelhető és elkülöníthetők az egyes habok zömülési fázisa. 20mm-es elmozdulásig figyelhető meg az alacsonyabb sűrűségű ($0,4\text{g/cm}^3$) plató szakasza, amely ezt követően el kezd felkeményedni. Ez a szakasz azonban már a nagyobb sűrűségű hab ($0,7\text{g/cm}^3$) lineárisan rugalmas deformációjával esik egybe. 23 mm-től megkezdődik a nagyobb sűrűségű hab plasztikus deformációja, vagyis egy magasabb energiaszintű plató szakasz, amely 45mm elmozdulásig tart.

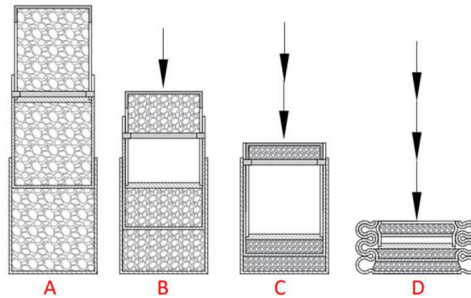


4. Ábra: Különböző sűrűségű fémhabok egyidejű zömítése egymásra helyezve [Saját szerkesztés]

A „C” szakasz a nagyobb sűrűségű/teljesítményű abszorber teljes felkeményedésével zárul, a tagok teljes mértékbe egymásba csúsznak. Ezen fázis végéig a szerkezet továbbra is szétszerelhető és felújítható marad, az abszorber töltet cserélhető. Amennyiben az alsó tagban is azonos sűrűségű/teljesítményű abszorbert alkalmazunk, akkor a „B” és a „C” fázis egybe esik. A „D” szakaszban a vékonyfalú szerkezet gyűrődése kezdődik meg, melynek működőképes falvastagsága immáron a három, egymásba csúszott tag falvastagságának összegével egyezik meg. A vékonyfalú szerkezet plasztikus deformációja már csak akkor valósul meg, ha az előző deformációs fázisokban az energia abszorpció nem teljesült maradéktalanul, vagyis az ütközési energia nagyobb volt, mint amennyit az abszorberek képesek lettek volna elnyelni. A konstrukció működési lépéseit mutatja be a 5. ábra, félnézet-félmetszet formában.



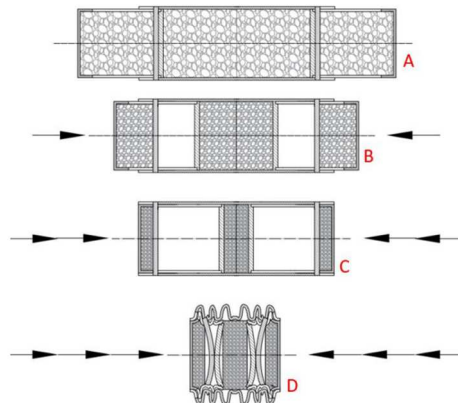
5. Ábra: Az 1.sz. konstrukció működése félnézet-félmetszetben [Saját szerkesztés]



6. Ábra: 1.sz. konstrukció gyűrődési lépései (azonos abszorberek esetén) [Saját szerkesztés]

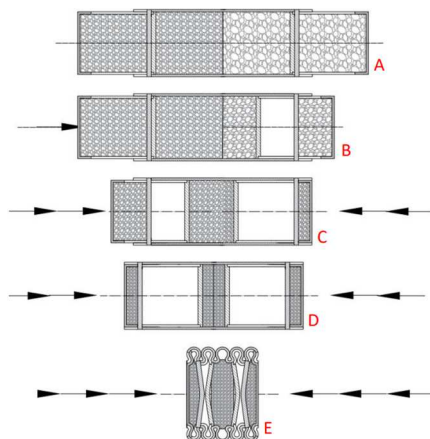
Az 6. ábra olyan változatot mutat, ahol mindhárom tagban azonos sűrűségű/teljesítményű abszorber található. A szerkezet működése azonos, de az egyes fázisokban történő zömülések eltérnek. A „B” részleges gyűrődési fázisban ugyanis mindhárom abszorber zömülése egyidejűleg történik. A „C” szakasz az abszorberek teljes felkeményedésével zárul, a tagok teljes mértékbe egymásba csúsznak. A „D” szakaszban hasonlóan a vékonyfalú szerkezet gyűrődése kezdődik meg az ütközési energia maradvány révén.

A fejlesztés során kidolgoztunk egy olyan konstrukciós változatot is, amely ugyan nagyobb konstrukciós térfogattal bír, azonban az abszorber töltet zömítése két irányból történik. Ezt a koncepciót mutatja be az 7. ábra.



7. Ábra: 2.sz. konstrukció gyűrődési lépései (azonos abszorberek esetén) [Saját szerkesztés]

A két szélső és a középső tagban is egyaránt azonos sűrűségű/teljesítményű abszorber található. A középső és szélső tag átmeneti/szilárd illesztéssel szerelt, vagy ehhez ragasztástechnikai módszer is alkalmazható. Ragasztás esetében az energia abszorpció kezdetét a kötés nyírásához szükséges erő határozza meg, míg szilárd illesztésnél a fedés mértéke. A konstrukció működésbe lépésének és mozgásban való tartásának feltétele a abszorber és a crashbox fala közötti, valamint a tagok közötti nyugvó és dinamikus súrlódás leküzdése. Természetesen ez a konstrukció modulálható különböző abszorberek egyidejű alkalmazásával, ahogy azt a 8. ábra és a 9. ábra is mutatja.



8. Ábra: 2.sz. konstrukció gyűrődési lépései (eltérő abszorberek esetén) [Saját szerkesztés]



9. Ábra: 2.sz. konstrukció gyűrődési lépései pillanatképekben [Saját szerkesztés]

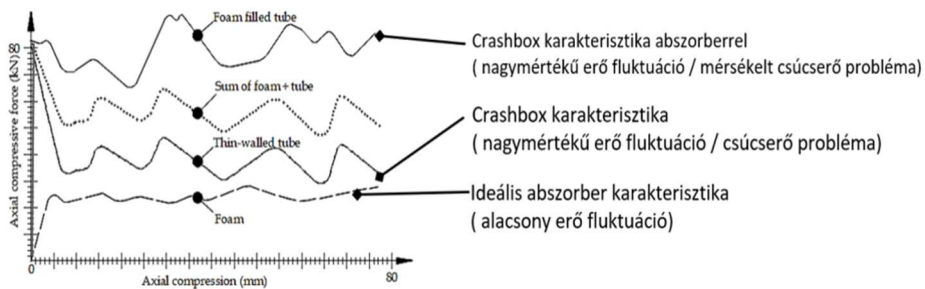
ÖSSZEHASONLÍTÁS MÁK KONSTRUKCIÓKKAL

A mai technológiák és kutatások alkalmazzák ugyan az abszorber integrációt crashbox-ok esetében azonban ezeknél a megoldásoknál vékonyfalú szerkezet és az abszorber gyűrődése egyidejűleg történik, elveszítve ezzel a töltet előnyös gyűrődési jellemzőit, ahogy az a xx. ábrán is látható. Továbbá részleges gyűrődés során a crashbox belsejében alkalmazott abszorber egy jelentős része zömületlen, vagyis energia abszorpció tekintetében kihasználatlan állapotban marad, ami a szerkezet hatékonysága szempontjából hátrányos. Ez azt jelenti, hogy ezeknél a megoldásoknál az alkalmazott abszorber csak a szerkezet teljes gyűrődése során használható ki maradéktalanul. Ezt a részleges gyűrődésnél jelentkező problémát mutatja a 10. ábra, amelyen a pirossal megjelölt rész jelöli a crashbox belsejében kihasználatlan állapotban maradt abszorbert.



10. Ábra: Zömületlen állapotban maradt abszorber a crashbox belsejében részleges gyűrődés esetén [27]

Az egytagú szerkezetek további hátránya, hogy a gyűrődést és ez által az ütközés pillanatában jelentkező lassulás jellemzői, valamint az elnyelt energia mértékét elsősorban a vékonyfalú szerkezet határozza meg. Illetve ahogy azt a 10. ábra is mutatja részleges gyűrődése során a teljes szerkezet cseréje szükséges.

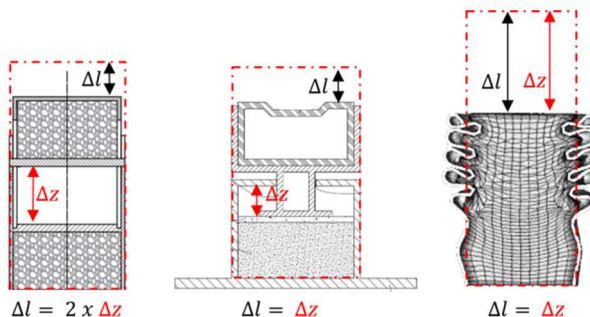


11. Ábra: Erő fluktuáció és csúcserő alakulása az elmozdulás függvényében (Szerkesztve : [28] alapján)

Megoldásunk a jelenleg ismert technológiákhoz képest annak modulálhatóságában is különbözik, vagyis kis energiájú ütközésnél csak az abszorber töltetek szenvednek plasztikus deformációt. Míg a vékonyfalú szerkezet maradó deformációja már csak egy nagyobb energiájú ütközésnél következik be. Továbbá a teleszkóp szerkezetnek köszönhetően különböző típusú és sűrűségű abszorberek egyidejű vagy elkülönített zömítése hozható létre radiálisan gátolt deformációjuk mellett.

DEFORMÁCIÓ ÁTTÉTEL

Természetesen az alkalmazott abszorberek által elnyelt energia arányos a zömülésük mértékével. Az xx. ábrán bemutatott konstrukciónál egységnyi crashbox hossz-változás (Δl) egységnyi abszorber zömülést (Δz) jelent, tehát $\Delta l = \Delta z$. A jelenlegi megoldásunk azonban a többtagú kialakításának köszönhetően egységi crashbox hosszváltozás (Δl), a szerkezet belsejében kétszeres abszorber zömülést (Δz) képes generálni, vagyis $\Delta l = 2 \times \Delta z$. Az 12. ábra összehasonlítás céljából készült, ahol az általunk fejlesztett konstrukció figyelhető meg másik két, gyakran alkalmazott crashbox megoldással összevetve.

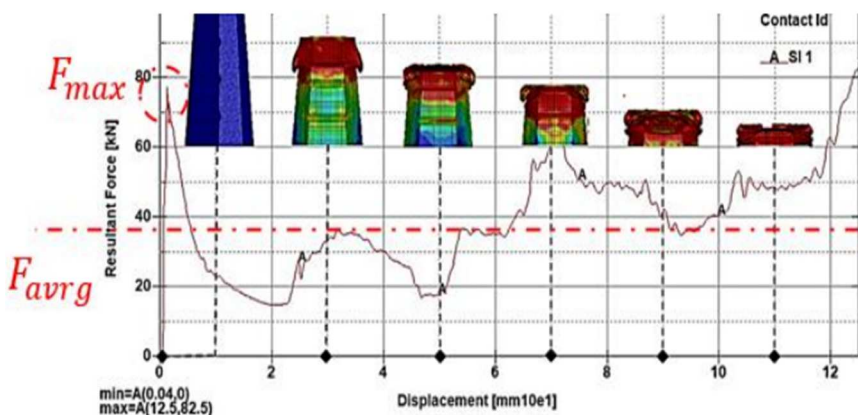


12. Ábra: Deformáció áttétel értelmezése [Saját szerkesztés]

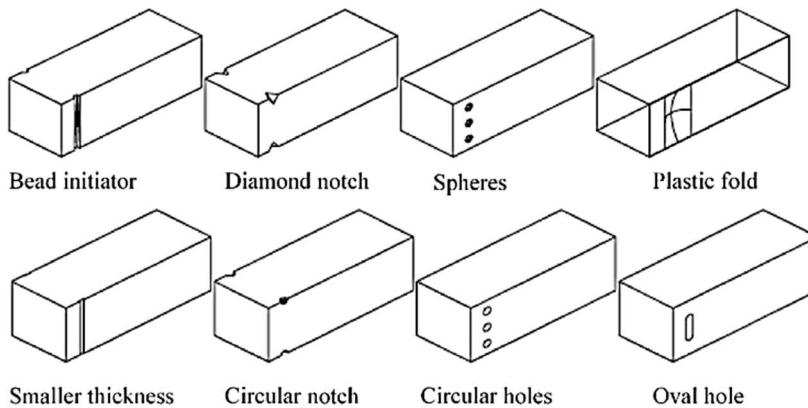
KEZDETI CSÚCSERŐ PROBLÉMA

A crashbox szerkezetek működésbe lépésének mértéke (merevsége) alapvetően meghatározza az ütközés pillanatában jelentkező lassulás mértékét. Túlságosan nagy merevség nagy csúcserőt von maga után, amely fokozza a személyi sérülések és műszaki károk mértékét, hiszen a csúcserőt meghaladva indulhat el a szerkezet plasztikus deformációja. Ezt a csúcserő problémát mutatja a 13. ábra. Hagyományos crashbox szerkezetek esetében a kezdeti csúcserő (F_{max}) többszöröse is lehet az átlagos zömülési erőnek (F_{avg}), ez nagymértékben rontja a szerkezet törési hatékonyságát (CFE)[29-30]. Az xx. ábra alapján ez egy 50-60%-os hatékonyságot eredményez. A csúcserő jelentősen csökkenthető úgynevezett gyűrődés indító technikai megoldásokkal, amely olyan bordák, kimunkálások, furatok esetleg élettörések alkalmazását jelenti, amelyek a crashbox feszültséggyűjtő pontokként jelennek meg, és a plasztikus deformáció ezáltal hamarabb következik be. Törés indító konstrukciók lehetőségeket mutat be a 14. ábra.

$$CFE = \frac{F_{avg}}{F_{max}} [\%]$$

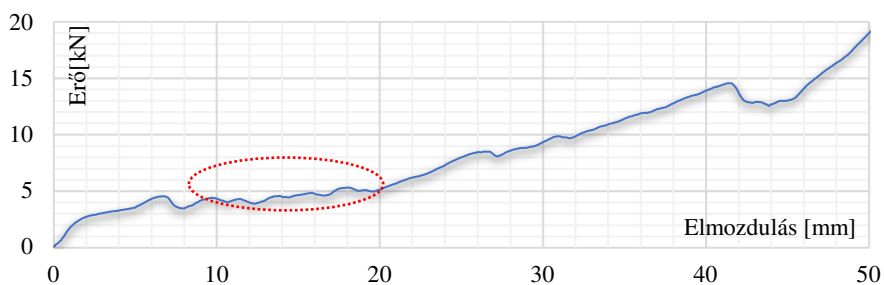


13. Ábra: A kezdeti csúcserő és az átlagos deformációs erő aránya [Saját szerkesztés]

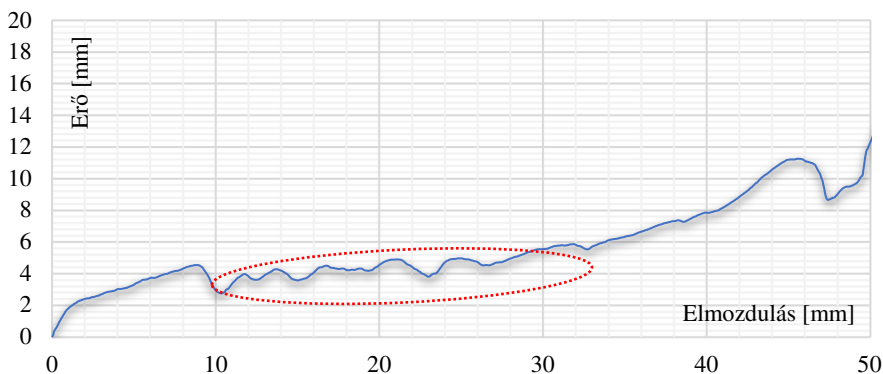


14. Ábra: A kezdeti csúcserő csökkenése érdekében alkalmazható technikai megoldások [31]

Az általunk fejlesztett konstrukció ezen csúcserő problémára is megoldásként szolgálhat, amelyet a fent ismertetett $CFE \cong 80 - 90\%$ hatékonysági értékkel lehet igazolni azonos periódust vizsgálva. Erő-fluktuáció már csak a abszorberek teljes zömülése után jelentkezhet, amikor megindul a crashbox héjszerkezet harmonika szerű gyűrődése. Ez már egy magasabb ütközési energia szintet követel meg, amikor is az alkalmazott abszorberek nem képesek felemészteni a teljes ütközési energiát. A 14. ábra és az 15. ábra a zömítési teszteset során kapott diagramokat mutatja, melyen jól megfigyelhető, hogy egyenletesebb, lineárisan növekvő karakterisztikát ad az optimalizált crashbox annak gyűrődése során, valamint jól kivethető a platószakasz is, vagyis az abszorber előnyös tulajdonságai megtarthatók. Az 14. ábra az 1.sz. konstrukció azon változatának diagramját mutatja, ahol alacsonyabb sűrűségű ($0,4\text{g/cm}^3$) fémhabbal töltöttük meg az alsó tagot és nagyobb sűrűségű ($0,7\text{g/cm}^3$) fémhabot használtunk a középső és felső tag tölteteként. A 15. ábrán pedig egy olyan változat erő-elmozdulás diagramja látható, ahol minden egyes tagban azonos sűrűségű ($0,4\text{g/cm}^3$) fémhabot alkalmaztunk. A két ábrát összehasonlítva látható, hogy annál a konstrukciónál, ahol csak egyféle abszorbert használtunk a plató szakasz tovább fenntartható, egészen 33 mm elmozdulásig, amelyet piros színnel jelöltünk. A csúcserő már csak a működés végén jelentkezik, addigra felemészte az ütközési energia egy jelentős részét.



14. Ábra: Az 1.sz. konstrukció gyűrődési karakterisztikája különböző sűrűségű fémhabok alkalmazása esetén [Saját szerkesztés]



15. Ábra: Az 1.sz. konstrukció gyűrődési karakterisztikája egyféle sűrűségű fémhab alkalmazása esetén [Saját szerkesztés]

KONKLÚZIÓ

Alacsony sebességű ütközések, vagyis 16 km/h sebességig a passzív biztonsági rendszer részét képező lökhárító berendezésnek kell olyan gyűrődési képességgel rendelkeznie, amely energia abszorpció révén képes megakadályozni a jármű fő alváz elemeinek (pl. nyúlványok) bármilyen mértékű deformációját. Ennek eszköze a lökhárító merevítő és a nyúlványok között elhelyezkedő, úgynevezett crashbox alkatrész plasztikus deformációja. Ezen vékonyfalú szerkezetek energia elnyelő képessége, és gyűrődési tulajdonságai alako optimalizációval javítható. Másik megoldás az energia hatékonyság növelése céljából a szerkezet abszorberekkel való integrálása, pl. fémhabok, lattice szerkezetek, kompozitok. Viszont, hogy az így alkalmazott ideális gyűrődési karakterisztikákkal rendelkező abszorberek előnyös tulajdonságait ne veszítsük el, a vékonyfalú szerkezet konstrukciós továbbfejlesztése szükséges. Az általunk kidolgozott megoldásunk az ütközési/ütési energia hatékonyabb abszorpcióját hivatott megoldani a tömegoptimalizáció figyelembe vételével, ezért elsősorban járműiparban való alkalmazásra javasolt. Ezen belül személy és kisteherjárművek első-hátsó lökhárító rendszereinek hatékonyságának növeléséhez, valamint tehergépjárművek és pótkocsik hátsó és oldalsó aláfutásgátló rendszereinek kiegészítéséhez növelt energia abszorpció céljából. Felhasználási területe lehet a modern elektromos/hibrid/üzemanyagcellás személyszállító járművek (buszok) azok hátsó részeinek védelmének fokozása céljából. A kutatáshoz kapcsolódó mérések igazolták, mind a fémhabok alkalmasságát mint abszorber töltet, mind pedig a konstrukció működő képességét alátámasztva ezzel a fejlesztés kezdeti szakaszában megfogalmazott hipotéziseket. A tesztelések során kapott diagramok alapján kijelenthető, hogy a fejlesztett konstrukció gyűrődése esetén nem veszítjük el az abszorberek előnyös tulajdonságait.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Zhu, Y., Li, L., & Yang, J. (2012, July). Frontal structure improvement on car based on RCAR impact test. In 2012 Third International Conference on Digital Manufacturing & Automation (pp. 434-438). IEEE.
- [2] Opperman, C. J. (2012). Study of a simplified bumper system subjected to offset impact loading.

- [3] Li, M., Xia, Z., & Shangguan, W. (2018). Analysis and Simulation of Low-Speed Collision of Car Front Bumpers (No. 2018-01-1460). SAE Technical Paper.
- [4] Ramon-Villalonga, L., & Enderich, T. (2007). Advanced Simulation Techniques for Low Speed Vehicle Impacts. Sixth LS-DYNA Anwenderforum, Frankenthal, 25-36.
- [5] Cheni, R. K., Sinha, A., & Narayan, S. (2013). Enhanced light weight frontal crash box design for low speed and insurance tests (No. 2013-26-0023). SAE Technical Paper.
- [6] Morello, L., Rossini, L. R., Pia, G., Tonoli, A., Morello, L., Rossini, L. R., ... & Tonoli, A. (2011). Body Components. *The Automotive Body: Volume I: Components Design*, 207-437.
- [7] Constantin, B. A., Iozsa, D., & Fratila, G. (2016, November). Studies about the Behavior of the Crash Boxes of a Car Body. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 161, No. 1, p. 012010). IOP Publishing.
- [8] Lee, K. H., & Bang, I. K. (2006). Robust design of an automobile front bumper using design of experiments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 220(9), 1199-1207.
- [9] Hou, W., He, P., Yang, Y., & Sang, L. (2023). Crashworthiness optimization of crash box with 3D-printed lattice structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 247, 108198.
- [10] Rayamajhi, M., Hunkeler, S., & Duddeck, F. (2014). Geometrical compatibility in structural shape optimisation for crashworthiness. *International Journal of Crashworthiness*, 19(1), 42-56.
- [11] Ciampaglia, A., Fiumarella, D., Niutta, C. B., Ciardiello, R., & Belingardi, G. (2021). Impact response of an origami-shaped composite crash box: Experimental analysis and numerical optimization. *Composite Structures*, 256, 113093.
- [12] Ghasemnejad, H., Hadavinia, H., Marchant, D., & Aboutorabi, A. (2008). Energy absorption of thin-walled corrugated crash box in axial crushing. *SDHM Structural Durability and Health Monitoring*, 4(1).
- [13] Choi, S. Y., Hong, S. C., Park, S. K., & Jeong, S. W. (2022). Effects of diameter-to-thickness ratio on impact energy absorption capability of CFRP cylindrical crash box. *International journal of automotive technology*, 23(6), 1663-1671.
- [14] Pavlovic, A., & Fragassa, C. (2024). Investigating the crash-box-structure's ability to absorb energy. *International Journal of Crashworthiness*, 1-15.
- [15] Abdullah, N. A. Z., Sani, M. S. M., Salwani, M. S., & Husain, N. A. (2020). A review on crashworthiness studies of crash box structure. *Thin-Walled Structures*, 153, 106795.
- [16] Ma, J., & You, Z. (2011). The origami crash box. *Origami*, 5(277-290), 587.
- [17] Nisa, S. U., Pandey, S., & Pandey, P. M. (2023). A review of the compressive properties of closed-cell aluminum metal foams. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 237(2), 531-545.
- [18] Xia, X. C., Chen, X. W., Zhang, Z., Chen, X., Zhao, W. M., Liao, B., & Hur, B. (2013). Effects of porosity and pore size on the compressive properties of closed-cell Mg alloy foam. *Journal of Magnesium and Alloys*, 1(4), 330-335.

- [19] Movahedi, N., & Mirbagheri, S. M. H. (2016). Comparison of the energy absorption of closed-cell aluminum foam produced by various foaming agents. *Strength of Materials*, 48, 444-449.
- [20] Blazy, J. S., Marie-Louise, A., Forest, S., Chastel, Y., Pineau, A., Awade, A., ... & Moussy, F. (2004). Deformation and fracture of aluminium foams under proportional and non proportional multi-axial loading: statistical analysis and size effect. *International journal of mechanical sciences*, 46(2), 217-244.
- [21] Gioux, G., McCormack, T. M., & Gibson, L. J. (2000). Failure of aluminum foams under multiaxial loads. *International Journal of Mechanical Sciences*, 42(6), 1097-1117.
- [22] Duarte, I., Vesenjak, M., & Krstulović-Opara, L. (2016). Compressive behaviour of unconstrained and constrained integral-skin closed-cell aluminium foam. *Composite Structures*, 154, 231-238.
- [23] Li, C., Li, C., & Wang, Y. (2020). Compressive behavior and energy absorption capacity of unconstrained and constrained open-cell aluminum foams. *Advanced Composites Letters*, 29, 2633366X20923671.
- [24] Wang, G., Zhang, Y., Zheng, Z., Chen, H., & Yu, J. (2022). Crashworthiness design and impact tests of aluminum foam-filled crash boxes. *Thin-Walled Structures*, 180, 109937.
- [25] OKORUGBO, P. A. (2019). Effect of impact velocity on the energy absorption characteristics of crash boxes. PhD diss., NEAR EAST UNIVERSITY.
- [26] Kocabaş, İ., & Yılmaz, H. (2021). Crashworthiness performance of Al6061 tubes with stiffened quatrefoil sections under axial and oblique impact conditions. *Mühendis ve Makina*, 63(706), 23-40.
- [27] Zarei, H. R., & Kröger, M. (2008). Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application. *Thin-Walled Structures*, 46(2), 214-221.
- [28] Ashby, M.F.; Evans, T.; Fleck, N.A.; Hutchinson, J.W.; Wadley, H.N.G.; Gibson, L.J. *Metal Foams: A Design Guide*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2000.
- [29] Ceyhan, M., & YILDIZ, B. (2023). Investigation of Crash Performance of Multi-Cell Crash-Boxes. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(3), 613-621.
- [30] Turan, M. K., Ensarioglu, C., Bakirci, A., & Karpat, F. (2024). Impact performance of unconventional trigger holes. *Materials Testing*, (0).
- [31] Harhash, M., Kuhtz, M., Richter, J., Hornig, A., Gude, M., & Palkowski, H. (2021). Trigger geometry influencing the failure modes in steel/polymer/steel sandwich crashboxes: Experimental and numerical evaluation. *Composite Structures*, 262, 113619.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetet nyilvánítanak ÚNKP, a Kulturális és Innovációs Minisztériumnak, valamint a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapnak, hiszen a kutatást segítette és anyagilag támogatta az Felsőoktatási Doktori Hallgatói Kutatói Ösztöndíj (ÚNKP-23-3) programja.

SZABADALMI NYILATKOZAT

A tanulmányban bemutatott konstrukció szabadalmi bejegyzése megtörtént, így azt szerzői jog védi, annak bármiféle hasznosítása vagy alkalmazása kizárólag a szerzők engedélyével történhet.