



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

KERTÉSZ JÓZSEF

Gépjárművek ütközésbiztonságának fokozása konstrukciós megoldással

Témavezető: Prof. Dr. Kovács Tünde Anna

**BIZTONSÁGTUDOMÁNYI
DOKTORI ISKOLA**

Budapest, 2025.08.31.

Nyilvános védés teljes bizottsága:

Elnök:

Prof. Dr. Réger Mihály

Titkár:

Dr. Lukács Judit

Tagok:

Dr. Kuzsella László

Dr. habil. Daruka Norbert

Dr. Pinke Péter

Opponensek:

Dr. habil. Gonda Viktor

Prof. Dr. Czinege Imre

NYILATKOZAT
A MUNKA ÖNÁLLÓSÁGÁRÓL, IRODALMI FORRÁSOK
MEGFELELŐ MÓDON TÖRTÉNT IDÉZÉSÉRŐL

Alulírott, **Kertész József** kijelentem, hogy a **Gépjárművek ütközésbiztonságának fokozása konstrukciós megoldással** című benyújtott doktori értekezést magam készítettem, és abban csak az irodalmi hivatkozások listáján megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, a forrás megadásával egyértelműen megjelöltem.

Budapest, 2025.09.19.

.....

(aláírás)

1 Tartalom

1. Bevezetés és a kutatási téma aktualitása	1
1.1 A doktori disszertáció céljai, célkitűzései	4
1.2 Kutatói hipotézisek:	5
1.3 Kutatási módszerek	6
2. Alacsony sebességű ütközésekről általában	7
2.1 Alacsonysebességű ütközések személyi jellemző sérülései	9
2.2 Az ütközések kinematikája	14
2.2.1 Reakció idő szerepe az ütközés kimenetében	15
2.2.2 Az ütközés típusai	15
3. Lökharító rendszerek	17
3.1 Crashbox kialakítások, gyűrődési jellemzők	18
3.1.1 Crashbox-ról általában	18
3.1.2 A gyűrődési mechanizmus folyamata	20
3.2 Csúcsrojt befolyásoló alakoptimalizációk	22
3.3 Fémhabbal integrált crashbox	25
3.4 Mutatószámok energia elnyelő szerkezetek jellemzésére	27
4. Zártcellás alumínium habok	29
4.1 Fémhabokról általában	29
4.2 Fémhabok előállítása	32
4.3 Fémhabok mechanikai vizsgálata	33
5. Súrlódási ellenállás mérése radiálisan gátolt fémhab zömítés esetén	35
5.1 Próbadarabok bemutatása	36
5.2 Mérési paraméterek, kondíciók	37
5.3 A súrlódás méréshez szükséges próbadarabok és a mérés menete	40
5.4 Mikroszkópos felületvizsgálat	43
5.5 Szabad és radiálisan gátolt zömítés eredményei	44
5.6 Energia abszorpció és hatékonyság	47
5.7 Súrlódási ellenállás meghatározása	49
5.8 A vizsgálatok alapján tett következtetések	55
5.9 Tézis	57
6. Fémhabok zömítése soros és párhuzamos koncepcióban	57
6.1 A mérés menete	59
6.2 Szabad zömítés eredményei	59

6.3 Párhuzamos elrendezésű koncepció mérési eredményei	60
6.4 Zömítés soros elrendezésben	61
6.5 Soros elrendezésű zömítés eredményeinek ismertetése	62
6.6 Plasztikus deformációra jutó energiahányad	64
6.7 Fémhabok vizsgálata összetett soros elrendezésben	64
6.8 A mérés alapján tett következtetések	67
6.9 Tézis.....	68
7. Crashbox szerkezetek gyűrődési karakterisztikájának VEM vizsgálata és optimalizálása..	68
7.1 A vizsgálat tárgya, peremfeltételek	69
7.2 Hálósűrűség, konvergencia vizsgálat.....	72
7.3 Keresztmetszet típusának hatása a gyűrődési értékekre	73
7.4 Kúpos kialakítás hatása	75
7.5 Bordázat hatása a gyűrődési jellemzőkre	78
7.6 Bordázat és kúpszög együttes alkalmazása	80
7.7 Konstrukciós hatékonyság meghatározása SEA, CFE és SE értékekkel.....	82
7.8 A vizsgálat alapján tett következtetések	84
7.9 Tézis.....	86
8. Alacsony ütközésssebességre optimalizált crashbox szerkezet	86
8.1 A technika állásának ismertetése	87
8.2 A szerkezet felépítése és működése	89
8.3 Deformáció áttétel	91
8.4 Az energia abszorpció folyamata.....	92
8.5 A szerkezet mechanizmusa	92
8.6 A működési elvet alkalmazó konstrukciós változatok	94
8.7 Zömítő vizsgálatok	97
8.7.1 Stroke Efficiency (SE).....	104
8.8 Különböző típusú fémhabetöltet alkalmazása a 2.sz. konstrukcióban	105
8.9 Zömítési erő ingadozása	106
8.10 Az optimalizált crashbox szerkezettel kapcsolatban megfogalmazott következtetések	109
8.11 Tézis.....	110
9. Összegzett következtetések, összefoglalás	110
9.1 Új tudományos eredmények	112
9.1.1 Tudományos eredmények hasznosítása, ajánlás	115
9.2 Tudományos eredmények hasznosítása, ajánlás	115

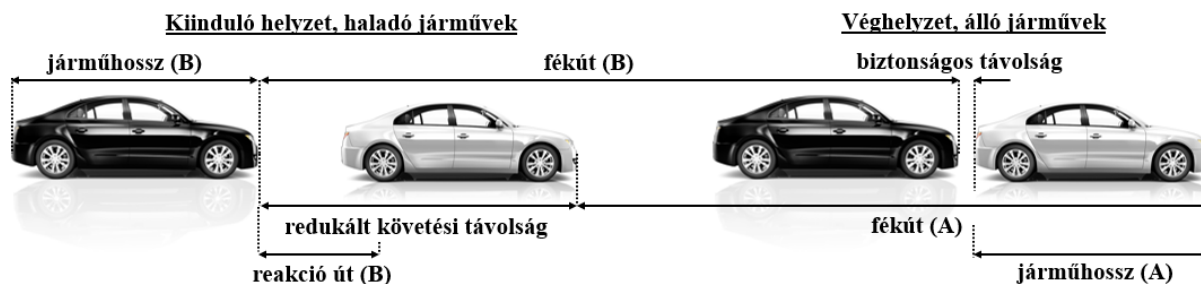
9.3 Jövőbeli tervek.....	115
9.4 Elért eredmények és következtetések angol nyelvű összefoglalója	115
Felhasznált irodalom	117
A jelölt értekezéssel kapcsolatos publikációi	124
A jelölt értekezéssel nem kapcsolatos publikációi	125
Rövidítés jegyzék	127
Táblázatjegyzék.....	128
Ábrajegyzék	129
Köszönetnyilvánítás	131

1. Bevezetés és a kutatási téma aktualitása

A közúti közlekedéshez kapcsolódó statisztikai adatokat elemezve azt találjuk, hogy Magyarországon a kutatói munkám kezdetének évében (2021) 4,6 millió, Európában pedig 286 millió regisztrált jármű volt az ACEA (European Automobile Manufacturers' Association) vagyis az Európai Autógyártók Szövetsége 2023-as adatai alapján [1]. Ráadásul ez a szám azóta is folyamatosan növekszik. A megnövekedett forgalom az infrastruktúra fejlesztési és fejlődési igényét is magával vonja, azonban a közlekedés jármű oldali növekedése nehezen követhető vagy kompenzálható újabb úthálózatok kiépítésével. A megnövekedett, közúti közlekedésben részt vevő járművek darabszáma magával vonja a közlekedés és forgalomtechnika tudományának egyik leginformatívabb mérőszámát, a sűrűséget. Az áramlatsűrűség az egységi idő alatt egységnyi útszakaszra vetített, azon áthaladó járműdarabszámot jelenti, és a követési távolsággal ad egyértelmű összefüggést. A sűrűség reciprokl értéke adja meg a követési távolságot, vagyis azt, hogy a járművek milyen mértékben zárkozhatnak fel egymás után, azaz mekkora a minimális-redukált követési távolság [2]. Ezek alapján könnyű belátni, hogy a fent említett növekvő jármű darabszám kisebb követési távolságokat eredményez. A sűrűsödő forgalom pszichológiai hatását is figyelembe véve azt tapasztalhatjuk, hogy a járművezetők a sűrűséggel arányosan egyre türelmetlenebb, feszültebb magatartást tanúsítanak, ami közlekedési agresszióban és szabálysértésben mutatkozik meg leginkább [3-5]. A nagy forgalom ugyanis megnövekedett utazási időt és lassú, araszoló haladást eredményez, amelyek kompenzációja az indokolatlan gyorsajtásban és a nem megfelelő követési távolságok megválasztásában mutatkozik meg. A redukált követési távolság nem csak a vizsgált jármű megállásához szükséges paramétereket veszi figyelembe, hanem az előtte haladó jármű lassulási tulajdonságait is, tehát a biztonságos követési távolság megegyezik a redukált követési távolsággal [2],[6]. Ebben az összefüggésben a közlekedésbiztonság mindhárom tagja (út, jármű, ember) megjelenik. A redukált követési távolság meghatározása (1):

$$l_{red.} = \frac{v_B^2}{2g(\mu_{1,B} \pm e)} + v_B \cdot t_{r,B} + l_{j,A} + l_{b,B} - \frac{v_A^2}{2g(\mu_{1,A} \pm e)} \quad (1)$$

Ahol a v a járművek haladási sebességét az l_j pedig a járművek hosszát jelöli, a μ a tapadási, míg az e az emelkedési és lejtési viszonyokat jellemző tényező. A t_R emberi reakció időt foglalja magába. Az „A” -val indexált paraméterek az elől haladó járműre vonatkoznak, a „B” index pedig a hátulról érkező járműre vonatkozik.



1. ábra A redukált követési távolság értelmezése

Azonban, ha ez a megválasztott követési távolság kisebb, mint a biztonságos megálláshoz szükséges útszakasz, akkor utol-éréses, másnéven ráfutásos balesetek alakulnak ki. Ráfutásos balesetek bekövetkezési sebességtartománya meglehetősen széles, hiszen belvárosi araszolásnál és autópályán nagysebességgel való haladás alakalmával is kialakulhatnak ezek a baleseti szituációk. Ezt az összefüggést igazolja a baleset típusokról szóló statisztikai elemzés, mely szerint a frontális ütközést és oldal ütközést követve a legnagyobb arányban előforduló ütközés a ráfutásos baleset. Közút típusaira vetítve azt találjuk, hogy a leggyakoribb megjelenési helyszín a ráfutásos eseteknek a belvárosi útszakaszok, elővárosi és bevezető szakaszok. Legnagyobb előfordulási valószínűségek pedig a reggeli és délutáni időszakokra tehetők [7],[8]. Ezekben a közlekedési szituációkban a nem megfelelően választott követési távolság és figyelmetlen és erőszakos járművezetői magatartás könnyen ráfutásos balesetet eredményez. A megnövekedett forgalom sűrűség miatt ezen ütközések legnagyobb százaléka alacsony sebességű ütközésnek tekinthetők, vagyis a résztvevő járművek sebesség különbsége nem haladja meg a 15-16 km/h értéket. (Mivel a nemzetközi szakirodalom „low-speed collision” kifejezést használja a 16 km/h alatti ütközésekre, a magyar terminológia pedig az „alacsony sebességű ütközés” szóösszetételt ezért a disszertáció további részében ezt a megnevezést használom.) Alacsony sebességű ütközések következményeit alapul véve két fő sebességtartományt különíthetünk el. Közlekedésbiztonság nemzetközi előírásai olyan merevséget követelnek meg a járművektől, amely átlagosan 8 km/h alatti ütközésnél garantálja a jármű sérülésmentes állapotát [9]. Ezt a szerkezeti merevséget elsősorban a passzívbiztonsági rendszer első zónája, a lökhárító rendszer kell, hogy garantálja. A lökhárító rendszer a lökhárító borítás és a nyúlvány közé szerelt keresztgerendából és energia elnyelőkből felépülő szerkezet. Funkcióját tekintve ezek alapján kettős, miszerint rendelkeznie kell legalább olyan merevséggel, amely meggátolja a maradó deformációt 8 km/h alatti ütközés esetén, valamint biztosítja az energia abszorpciót 8 és 16 km/h közötti sebesség tartományban. Energia abszorpció tekintetében viszont két módot kell megkülönböztetni a lökhárító rendszerre vonatkozóan, ezek a rugalmas, valamint a maradó deformációhoz tartozó energia megkötés.

8 km/h feletti ütközések esetén a személyi sérülések csökkentése érdekében a maradó deformációval megvalósuló energia abszorpció már megengedett. 16 km/h sebességű ütközésig a lökhárító rendszer rugalmas deformációja révén kell megtörténnie az energia abszorpciónak, mégpedig olyan mértékben és módon, hogy a jármű fő szerkezeti egységei, mint pl. az alváz, nyúlványok nem érhetik el a maradó deformációs állapotot. A lökhárító rendszer, mint passzív biztonsági elem biztonságtechnikai szempontú feladata tehát az alacsony sebességű ütközések következményeinek minimalizálása, megakadályozása mind személyi sérülések, mind műszaki károk tekintetében. A 8 km/h és 16 km/h közötti sebességű ütközési energia abszorpció és nyúlvány deformáció prevenciója a lökhárító rendszer részét képező crashbox-ok által elszenvedett plasztikus gyűrődése révén valósul meg. A „crashbox” szó szerinti fordításban „ütköző doboz”, ami a járművekben egy deformálódó energiaeinyelő szerkezet. A magyar nyelvben mind a köznyelv, mind a szakirodalom az angol megnevezést használja, ezért a disszertáció további részében ebben a formában használom.

Ezek a vékonyfalú szerkezetek speciális alak- és anyagtulajdonságuknak köszönhetően előre meghatározható, tervezhető gyűrődési jellemzőkkel bírnak, így az általuk elnyelni képes energia mennyiség már a tervezés fázisában ismeretes jellemző. Számos kutatás foglalkozik crashbox alakoptimalizációval, és alternatív anyagok alkalmazásával annak érdekében, hogy a szerkezet a lehető legnagyobb mennyiségű energia elnyelésére legyen alkalmas a legideálisabb gyűrődési karakterisztika mellett.

Kutatásom fókuszterülete a gépjárművek alacsonysebességű ütközésekre optimalizált crashbox szerkezetek fejlesztése konstrukciós megoldásokkal és fémhab integrációval a nagyobb ütközési energia abszorpció érdekében. A választott téma létjogosultságát mi sem igazolja jobban, mint az ide vonatkozó baleseti statisztikák, hiszen az aktív biztonsági rendszerek és önvezető funkciók gyors fejlődése ellenére a személyi sérülésekkel járó közúti balesetek száma még mindig nagyon magas, amelyek egy jelentős részét a ráfutásos, azon belül is az alacsony sebességű ütközések teszik ki. Az energiahatékony és fenntartható közlekedés kulcsfontosságú paraméter lett a járműfejlesztés területén, ezért a kutatás során ezt a kritériumot a tömegoptimalizáció és beépítési helyszükséglet követelményeivel vettem figyelembe.

1.1 A doktori disszertáció céljai, célkitűzései

Céлом, olyan alacsony ütközési sebességre optimalizált, crashbox konstrukció létrehozása, amely szerkezeti kialakításának köszönhetően képes nagymértékű ütközési energia abszorpcióra a káresemény során, csökkentve ezzel a személyi sérülések és a műszaki károk mértékét. A kutatás kezdetén fontos kritériumként fogalmazódott meg a tömegoptimalizáció is, amely a passzívbiztonsági rendszerek hatékonysága szempontjából gyakran ellentétes követelményként jelenik meg. Ezért a passzívbiztonsági rendszerek, köztük az energiaelnyelő szerkezetek optimalizációja komplex mérnöki gondolkodásmódot, új anyagok alkalmazását és fejlett konstrukciók megalkotását követeli meg.

A céлом, olyan termék vagy termékek megalkotása volt, amely nem csak elméleti szinten jelenik meg a biztonságstudomány területén, hanem alkalmas gyakorlati felhasználásra ezáltal a társadalom jobb és biztonságosabb létét szolgálja a közlekedésbiztonság területén keresztül. A fent megfogalmazott követelményeken túl a könnyű szerelhetőséget, a költséghatékony gyárthatóságot és a körkörös gazdaságba való visszavezethetőséget, tehát újrahasznosíthatósági elvárásokat is figyelembe véve kell a konstrukciós fejlesztést megoldanom.

A kutatás célja azonban nem csak ezen új crashbox szerkezetek konstrukciós munkájára és gyakorlati alkalmazhatóságára koncentrálódik, hanem olyan mérési eredmények és összefüggések feltárására is a fémhabokra vonatkozóan, amely más tématerületek kutatásait segíti, szolgálja. Crashbox szerkezetek alakoptimalizációja gyakori kutatási terület, ezért kutatásom során inkább anyagintegráció alkalmazásában láttam nagyobb lehetőséget és előremutató eredmények elérését. Ezért a crashbox szerkezetek energia elnyelési képességét zártcellás fémhabok integrációjával kívánom elérni, azzal a hipotézissel élve, hogy ezek az abszorberrel töltött crashbox szerkezetek - konstrukciós újragondolással - energiaelnyelő képessége és hatásfoka javítható, anélkül, hogy jelentősen növelnénk a szerkezet tömegét ezáltal a jármű önsúlyát. Ezért a kutatásom során kitüntetett szerepet kap a zártcellás alumínium habok különböző peremfeltételek melletti zömítő vizsgálata, hogy a lehető legnagyobb energia abszorpciót tudjam elérni általuk. A vizsgálatokhoz több különböző sűrűségű zártcellás alumínium habot használtam, amelyek energia elnyelő képességét szabad és radiálisan gátolt zömítésen keresztül vizsgáltam.

A radiálisan gátolt zömítés azonban egy kiaknázatlan területe a fémhab kutatásnak és a fémhabbal töltött crashbox szerkezetek konstrukciós fejlesztésének. A fémhabok ilyen elrendezésben történő zömítésükkor nagyobb energia abszorpció valósul meg, amely alapvetően két okra vezethető vissza. Az egyik, hogy a cellák alakváltozási lehetősége

radiálisan gátolt ezért, nagyobb energia szükséges azok elasztikus és plasztikus deformációjához egyaránt, hiszen a Poisson-hatás nem tud érvényesülni. A másik ok a vékonyfalú szerkezet fala és a hab között jelentkező Coulomb-féle súrlódás a zömülés során [10-14]. Ezen tanulmányokban azonban nem számolnak be arról, hogy a radiálisan gátolt zömítés során jelentkező energia többlet hány százaléka vezethető vissza az alkatrészek között ébredő súrlódásra.

Ennek meghatározása azért célom, mert a súrlódás által az energia elnyelőkben és ütköző elemeknél nagyobb energia abszorpció lenne elérhető kizárólag a súrlódási feltételek növelésével, ami a ráadásul nem jár többlet tömeggel.

A fémhabok alkalmazásával lehetőséget láttam a modulálható crashbox szerkezetek megalkotásában, melynek műszaki hátterét a fémhabok soros és párhuzamos elrendezésben történő zömítése adja a radiálisan gátolt zömítés elvén működve, ezért célom ezen fémhab elrendezések laboratóriumi vizsgálata.

Passzív biztonsági rendszerek fejlesztése során azonban nem csak a tömegoptimalizációs szempontok figyelembevétele fontos, hanem a szerkezetek helyigénye is, hiszen ezek alapvetően meghatározhatják a jármű szerkezeti felépítését, formavilágát, és kialakítását.

Azt könnyű belátni, hogy a gyűrődő zóna deformációja arányos az általa elnyelt energia mennyiségével. Ez a visszafelé történő baleseti számításoknál (EES – módszer) is gyakran alkalmazott módszer. Ezért a konstrukciós fejlesztéssel célom volt, hogy a gyűrődő zóna/alkatrész működő deformációs hosszának növelése nélkül tudjam fokozni a szerkezet energia elnyelő képességét, anélkül, hogy jelentősen növelném a konstrukció tömegét vagy a beépítési helyszükségletét.

1.2 Kutatói hipotézisek:

A dolgozatomban az alábbi kutatói hipotézisek teljesülését vizsgálom:

1. Feltételezem, hogy $0,4$ és $0,7 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű, zártcellás alumínium fémhab radiálisan gátolt, AW6060 alumínium csövön belüli zömítéséhez szignifikánsan több mechanikai energiára van szükség a szabad zömítésükhöz képest. Valószínűsítem, hogy a radiálisan gátolt zömítés során jelentkező mechanikai energia abszorpció többlet egy jelentős részét a cső belső felülete és a fémhab között ébredő súrlódási ellenállás okozza, vagyis a zömítés alkalmával a súrlódási ellenállás leküzdésére fordítódik. Továbbá feltételezem, hogy a súrlódási ellenállás mértékét a fémhab és a cső fala között ébredő súrlódási együttható valamint a fémhab porozitása és a kontaktmechanizmus határozza meg. Mérésekkel kívánom igazolni, azt a hipotézisemet, hogy a belső zömítésű, fémhabbal töltött crashbox

szerkezetek energia abszorpciós képessége, és ezáltal ütközésbiztonsági hatásfokuk növelhető a súrlódási paraméterek növelésével, ez azt jelenti, hogy tömegnövelés nélkül is fokozható egy gyűrődő elem energia elnyelő képessége.

2. Feltételezem, hogy a passzívbiztonsági szerkezetekben energia elnyelőként használt alumínium fémhabok energia abszorpciós képességét nem csak azok mechanikai paraméterei, hanem egymáshoz viszonyított helyzete és a zömítés relatív sorrendje is nagymértékben befolyásolja.
3. Azt feltételezem, hogy alumínium ötvözetből készített különböző keresztmetszetű crashbox szerkezetek plasztikus deformációjához (kezdeti csúcserő) szükséges zömítő erő mértéke csökkenthető kúpszög alkalmazásával, és a paláston alkalmazott törésindító, bordázat használatával, anélkül, hogy jelentősen csökkenne az energia abszorpciós képessége.
4. Feltételezem, hogy linearitás áll fenn alumínium ötvözetből készített crashbox-ok szerkezeti merevségi értéke és a próbatesten alkalmazott gyűrődést segítő kúpszög értéke között.
5. Feltételezem, hogy konstrukciós optimalizációval fejleszthető olyan fémhabbal integrált crashbox szerkezet, ami több energiát képes elnyelni egységnyi elmozdulásra számítva, mint a tömbösített fémhabból kialakított abszorber, miközben az energia abszorpció/tömeg arány értéke is javítható. Ezen kívül feltételezem, hogy egy teleszkópos működési mechanizmussal az adott crashbox alakváltozási stabilitása javítható, a kezdeti csúcserő értéke pedig függetleníthető a keresztmetszet típusától és a falvastagság értékétől.

1.3 Kutatási módszerek

Kutatásom módszertani alapját az irodalomkutatás; laboratóriumi mechanikai zömítő vizsgálatok; a 3D tervezés és végelelemes analízis, valamint ezen módszerek adta eredmények értékelése alkotják.

A kutatást a szakirodalom feldolgozásával és szakmai kitekintéssel kezdtem a baleseti statisztikákra vonatkozóan. Ezzel először is célom volt betekintést nyerni a mai közúti közlekedésbiztonság színvonalába és fejlődési irányába, valamint informálódni a leggyakoribb baleseti típusokról továbbá azok előfordulási körülményeiről. Ekkor tapasztaltam, hogy a ráfutásos balesetek az egyik leggyakoribb káreseménynek számítanak, ezért elkezdtem felkutatni, hogy a mai korszerű járművek milyen aktív és passzív biztonsági megoldásokkal tudnak hasznosítani ezekben a baleseti szituációkban a személyi sérülések és műszaki károk

csökkentése érdekében. Mivel a kutatás elsődleges célja a mechanikai konstrukciós fejlesztés ezért a passzívbiztonsági eszközök vizsgálatával folytattam az irodalomkutatást. Fontosnak tartottam megvizsgálni, hogy a ráfutásos baleseteknek milyen jellemző személyi sérülései vannak. Korábbi kárszakértői munkám során lehetőségem volt a járművek mechanikai sérüléseinek vizsgálatára, így az ott szerzett tapasztalatokat empirikus információkként hasznosítottam a kutatásom során.

Mivel a ráfutásos balesetek igen jelentős részét az alacsony sebességű ($v \leq 16$ km/h) ütközések teszik ki, ez magával vonta azt, hogy a fejlesztést a lökhárító rendszerre vonatkozóan kell elvégezni. Ezért következő lépésként információt gyűjtöttem elsősorban nemzetközi szakirodalmak és publikációk által a lökhárítórendszerek mai fejlesztési állapotáról és az ide vonatkozó hatósági előírásokról. Az informálódás ezen szakaszában lehetőséget véltem felfedezni a fémhabokkal integrált crashbox szerkezetek fejlesztésében, ezért az irodalomkutatást a fémhabok és azok mechanikai vizsgálatával foglalkozó tanulmányok elemzésével folytattam [15-18].

Számos fémhabokra jellemző mechanikai tulajdonságot azonban nem sikerült a szakirodalomból megtudnom, így laboratóriumi zömítő méréseket kellett végezni. Ezek elsősorban szabadzömítések, radiálisan gátolt zömítések és súrlódásmérés módszerét jelentették.

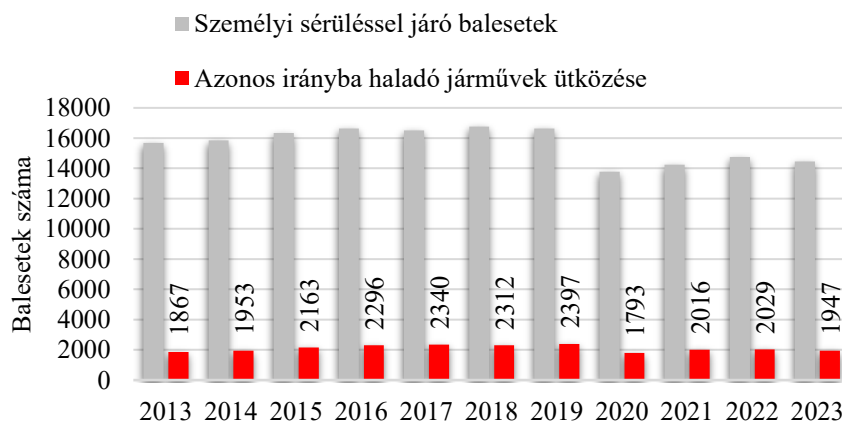
A crashbox-ok gyűrődési jellemzője befolyásolható alak sajátossággal [19-20], ezért a kutatást alakoptimalizációval folytattam. Mivel a 3D-ben megtervezett prototípusok legyártása költséges lett volna, ezért vége selemes analízist alkalmaztam, mint vizsgálati módszer. Azonban fontos volt az analízishez választott anyagmodell és paraméterezési eljárás validálása ezért zömítő gépen laboratóriumi mérést végeztem egy egyszerűsített próbadarabon, hogy összehasonlíthassam a numerikus vizsgálat és fizikai mérés eredményeit.

Végül a fejlesztett konstrukció működésének igazolására egyszerűsített próbadarabokat gyártottam és törésvizsgálatokat végeztem, majd a vizsgálat során kapott eredményeket kiértékeltem.

2. Alacsony sebességű ütközésekről általában

A kutatói munkát a közúti baleseti statisztikák elemzésével kezdtem, hogy információt kapjak a leggyakoribb baleset típusokról, előfordulási helyeiről és körülményeiről. Mivel Magyarország sem európai sem globális viszonylatban nem teljesít kiemelkedően a balesetei statisztikákat tekintve, ezért a hazai közlekedésbiztonsági adatokat vettem alapul a kutatásom létjogosultságának igazolásához. Elsőként a Központi Statisztikai Hivatal (KSH) és a Magyar

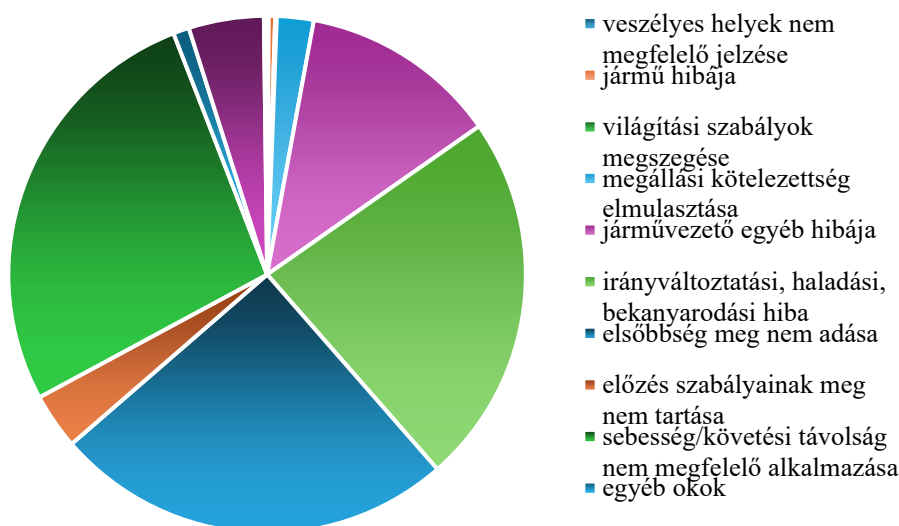
Közút (MK) jóvoltából készített elemzéseket használtam, és az elmúlt 10 év adatait vizsgáltam 2023. júniusi adatokkal bezárólag. (Ennek oka, hogy a dolgozat írásakor még nem álltak rendelkezésre 2023-as teljes évi adatok.) Az adatok elemzése során az egyik legszembetűnőbb az volt, hogy 10 év távlatában érdemi javulást nem sikerült elérni a közlekedésbiztonság területén, hiszen nagyságrendileg a közúti balesetek száma 2011 óta a 15 ezres érték körül ingadozik, sőt az elmúlt három év csökkenése is csak a járvány okozta közúti forgalom csökkenésével magyarázható. Azonban mindenképpen figyelembe kell venni, hogy ugyan ezen időszakra vetített forgalomban lévő járművek darabszáma hazánkban is drasztikusan emelkedett, hiszen amíg ez a szám 2011-ben 2,9 millió járművet jelentett, 2021-re elérte a 4,6 milliós darabszámot [1][9] [KJ124]. Ilyen tekintetben viszont az egy járműre vetített baleseti szám jelentősen csökkent, ami már pozitív eredményként értékelendő. A balesetek jellege alapján a statisztikákat tovább elemezve azt tapasztaltam, hogy az „azonos irányba haladó” és „azonos irányba haladó és kanyarodó járművek” gyűjtőnéven „ráfutásos balesetek” kategóriájában lényegi változás nem figyelhető meg, sőt az összes baleseti eseményhez viszonyítva egyre nagyobb hányadot képez. Ez azt jelenti, hogy a pályaelhagyásos és az oldalirányú ütközéseket követően a harmadik leggyakoribb káresemény típus a ráfutásos balesetek magyarországi és európai szinten is. A 2. ábra a Magyarországon bekövetkezett ráfutásos balesetek számát mutatja az összes baleset függvényében az elmúlt 10 év távlatában [7].



2. ábra a Ráfutásos balesetek tendenciája Magyarországon (Saját szerkesztés [7] alapján)

A személysérüléses balesetek elsődleges kiváltó oka a „sebesség nem megfelelő alkalmazása” került megjelölésre 27 %-kal, ezt követi az „elsőbbség meg nem adása” 25 %-kal, majd az „irányváltoztatási, haladási, bekanyarodási hiba” 23 %-kal [7]. Ezek alapján kijelenthető, hogy a balesetek nagyon jelentős részét továbbra is a közlekedés három fő résztvevője (út, ember, jármű) közül, az ember okozza, mulasztások és figyelmetlenségek révén (3.ábra). Érdekesség,

hogy a balesetek csupán 0,4 %-a vezethető vissza a jármű műszaki hibájára, tehát a közlekedés biztonság fokozása továbbra is a gépjárművezetők kezében van. A kutatási fő fókuszterület megjelöléséhez szükséges megvizsgálni, hogy hol történnek ezek a balesetek, mert abból következtethetünk a haladási sebességekre és ezáltal az ütközés energiájára.



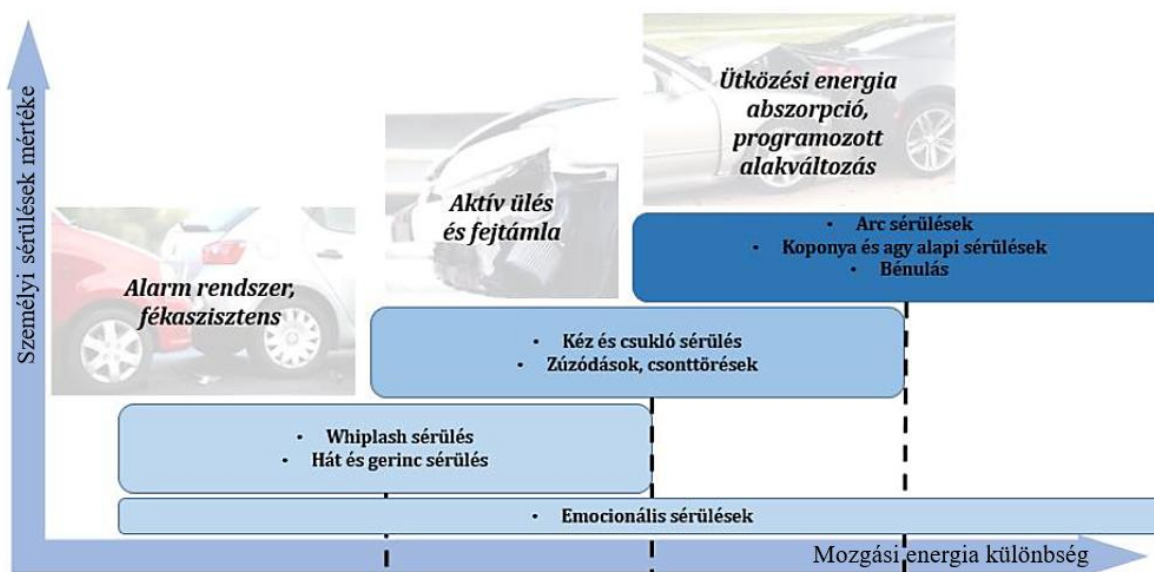
3. ábra A baleseteket kiváltó okok (Saját szerkesztés [7] alapján)

2.1 Alacsonysebességű ütközések személyi jellemző sérülései

A közlekedés és ütközésbiztonság filozófiája szerint az elsődleges cél a személysérülés megakadályozása vagy csökkentése és csak másodlagos a műszaki károk figyelembe vétele. Ezért a kutatás elején fontosnak tartottam megismerni a ráfutásos balesetekre jellemző személyi sérülések típusait.

A személysérüléses közúti közlekedési baleset olyan hirtelen bekövetkező, váratlan többnyire nem szándékosan előidézett forgalmi esemény, amely közúton következik be, vagy onnan ered, amelyben legalább egy mozgó (közúti) jármű részt vett, és amelynek következménye haláleset vagy legalább személyi sérülés. A káresemény következményeként jelentkező személyi sérülések alapján a baleseteket három fő kategóriába különíthetjük el, melyek a halálos, súlyos és könnyű sérülések esetek. A halálos kimenetelűnek tekintünk egy közúti balesetet, ha annak következtében valaki a helyszínen, vagy a bekövetkezés időpontjától számítva 30 napon belül életét veszti. A haláleset hivatalos bizonylata minden esetben kórházi vagy hatósági szakorvosi jelentésnek kell, hogy legyen. A balesetet elszennedő egyén amennyiben nyolc napon túl gyógyuló sérülést szenved, súlyos kimenetelű káreseménynek tekintjük. Ha a balesetben szerzett sérülések nyolc napon belül gyógyulók, akkor könnyű

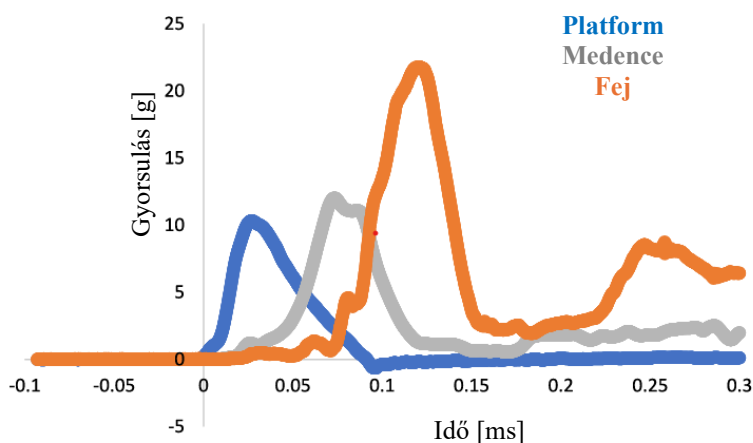
sérüléses eseményről beszélünk [21]. A fenti statisztikai adatok azt mutatják, hogy a ráfutásos balesetek bekövetkezésének gyakori helyszíne a belvárosi szakaszok, kereszteződések, nagyvárosi bevezető szakaszok. Ezen káresemény egyik legjellemzőbb forgalmi szituációja a zsúfolt útszakaszokon kialakuló araszoló haladás. A nem megfelelően megválasztott követési távolság és a türelmetlen, agresszív vezetői magatartásnak köszönhetően a ráfutásos baleset egy könnyen és hirtelen kialakuló baleset forma [3-5]. Az így kialakuló forgalmi szituáció nem teszi lehetővé a nagysebességű ütközést, ezért sok esetben a hátulról történő ütközések nem minősülnek rendkívül súlyos közúti balesetnek, mit pl. egy frontális ütközés. Az ütközés energiája és formája azonban okozhat olyan sérüléseket, amelyek hatással lehetnek az egyén hosszútávú fizikai képességeire. A hátulról történő ütközések következtében az enyhe és a súlyos sérülések széles skálája kialakulhat, beleértve a hátfájást, a vállsérüléseket, a zúzódásokat, whiplash-t (ostorcsapás), a gerincsérüléseket, sőt a traumás agysérülést és más fejsérüléseket is. Ezek a balesetek olyan, már meglévő állapotok súlyosbodását is okozhatják, mint például a degeneratív porckorongbetegség [22-26]. A jellemző személyi sérülések típusait a következő ábrán (4.ábra) foglaltam össze a sebesség függvényében. [KJ124]



4. ábra A ráfutásos balesetek jellemző személyi sérülései a mozgási energia függvényében [KJ124]

A kutatás és a disszertáció fókuszterülete a lökhárító rendszer optimalizálás, amely az alacsony sebességű ütközési tartomány (0-16 km/h) legfőbb passzívbiztonsági rendszere. Ezért a fent részletezett személyi sérülések közül az én esetemben a kéz és csukló sérülések, zúzódások, hát és gerinc sérülések, valamint a whiplash sérülést kellett figyelembe vennem első sorban. A whiplash sérülés az elől lévő jármű utasainál kialakuló sérülésforma, amely a fej tehetetlenségéből adódó ostorcsapás szerű mozgásából alakul ki. A hátulról érkező ütősszerű

energia miatt a fej tehetetlenségéből adódóan hátrafelé mozdul és a fejtámla távolságától függően gyorsul majd annak nekiütközik, ahol hirtelen lelassul és az ellenkező irányba a járművel együtt újra felgyorsul. Az elől lévő jármű hirtelen gyorsulását, hirtelen lassulás követi, ami a fej teljes előre billenését okozza [27-28]. Az ütközési impulzusok időtartama a ráfutásos ütközések során 41 ms és 134 ms között van. Tanulmányok kimutatták, hogy hasonló delta-V (sebességváltozás) esetén az ütközési impulzusok időtartama jelentősen eltérhet, ami azt jelzi, hogy a különböző járművek és ütközési körülmények eltérő gyorsulási profilokat hozhatnak létre [29-30]. A ráfutásos balesetek időtartamán belül a 80-120 ms-os tartományban - tehát 40ms alatt - a fej teljes előre és hátra billenést szenved el, amely a felső nyaki csigolyák és merevítő izmok rendkívüli terhelését okozza, amely hosszútávú egészségügyi problémákat is okozhat [KJ116]. A gyorsulás csúcserőke ezeknél az eseményeknél nagyon változó lehet. A gyorsulási csúcserőke 2,8·g és 18,8·g között változhatnak, az ütközés konkrét körülményeitől és az érintett járművektől függően [31-33]. Az 5. ábrán egy hátsó ütközésre jellemző - fejre, a medencére és a vizsgáló platformra (szánra) vonatkoztatott - gyorsulási karakterisztika figyelhető meg [31].



5. ábra Példa a ráfutásos baleset gyorsulás függvényre [31]

Az idevonatkozó tanulmányok arról számolnak be, hogy az ostorcsapás-sérülést elszenvedő személyek 80%-a enyhe, de egy hétnél tovább tartó nyaki fájdalmat tapasztal. Hasonlóképpen, ezeknek a személyeknek kb. 50%-a több, mint egy évig is fájdalmai lehetnek az autóbalesetet követően [34]. A passzív biztonsági rendszerek személyi sérülések mértékét kifejező mérőszámokkal történő értékelése az egyik leginformatívabb jellemzés, amely egységes mérőszámokat követel meg az összehasonlíthatóság érdekében [KJ116].

A személyi sérülések hátterében egyértelműen a baleset pillanatában hirtelen bekövetkező lassulások és gyorsulások húzódnak meg. Az egyik legismeretesebb mutatószám a HIC (Head Injury Criteria) fejsérülési indikátor, amely az energiaelnyelő rendszerek hatékonyságának

leírására is alkalmas. Az ütközés pillanatában jelentkező lassulás/gyorsulás okozta fejsérülés lehetősége és mértéke a fejsérülési kritérium (HIC) segítségével számszerűsíthető, amelyet a fejgyorsulás nagyságának és időtartamának függvényében határozható meg. A HIC-mérőszámot először autóiipari biztonságtechnikai alkalmazásokhoz fejlesztettek ki, később sporteszközök és védőfelszerelések fejlesztéséhez is alkalmazták. A HIC az alábbi (2) összefüggéssel számítható [35-36].

$$HIC = \max_{(t_1, t_2)} \left\{ (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} \right\} \quad (2)$$

Ahol, a t_1 és t_2 a káresemény foronómia függvényéhez tartozó vizsgálati tartomány küszöbértékei, az $a(t)$ a fej által elszenvedett maximális lassulás mértékét fejezi ki. A kitevőben használt 2,5 érték pedig emberi és állati kísérleteken alapuló tényező [35-36].

A HIC értéke az úgynevezett rövidített sérülési skálával (AIS – Abbreviated Injury Scale) együtt használatos, amely az összes testrész sérülésének súlyosságát kódolja, és segítségével a súlyos sérülések vagy halál bekövetkezésének valószínűsége fejezhető ki. Az 1. táblázat az AIS szinteket mutatja a sérülés függvényében, az 2. táblázat pedig már az AIS és HIC kapcsolatát mutatja. A rövidített sérülési skála (AIS©) a jelenlegi orvosi terminológiát tartalmazza, és nemzetközileg elfogadott eszközt biztosít a sérülések súlyosságának osztályozására. Az AIS egy anatómiai alapú, konszenzuson alapuló, globális súlyossági pontozási rendszer, amely egy 6 pontos skálán (1=kisebb és 6=nagyobb) osztályozza az egyes sérüléseket testrégióként, azok relatív súlyossága szerint. Az AIS szabványosított terminológiát biztosít a sérülések leírására, és a sérülések súlyossága szerint rangsorolja őket. Az AIS jelenlegi felhasználói közé tartoznak az egészségügyi szervezetek a klinikai traumakezelés, a gépjárműbaleseteket vizsgáló szakemberek a sérülési mechanizmusok azonosítása és a járműtervezés javítása érdekében [37-38].

1. táblázat Az AIS kódok az elhalálozási valószínűség függvényében (Saját szerkesztés [37] alapján)

AIS kód	Sérülés szintje	Halálozási valószínűség
0	Nincs sérülés	0,0%
1	Minimális	0,0-0,1%
2	Mérsékelt	0,1-0,4%
3	Komoly	0,8-2,1%
4	Fokozott	7,9-10,6%
5	Kritikus	53,1-58,4%
6	Maximum	Lényegében nem élhető túl

2. táblázat Az AIS és HIC kapcsolata (Saját szerkesztés [37] alapján)

HIC	AIS	Fej sérülés
135-519	1	Fejfájás, szédülés
520-899	2	Eszméletvesztés < 1 óra (felszíni bőrsérülések)
900-1254	3	Eszméletvesztés 1-6 óra (koponya süllyedés)
1255-1574	4	Eszméletvesztés 6-24 óra (nyílt koponya törések)
1575-1859	5	Eszméletvesztés > 24 óra (agyi hematóma)
>1860	6	Nem túlélhető

A maximális megengedett fejsérülési kritérium (HIC) az ütközési tesztekben az adott szabályozástól és minősítési rendszertől függően változik. A HIC-t, mint jelölést gyakran követ egy alsó indexben feltüntetett számérték, amely a gyorsulási diagram vizsgálati intervallumát jelöli. Vagyis a következőkben szereplő HIC_{15} azt jelenti, hogy a fej tehetetlenségi mozgásából adódó, a gyorsulásérzékelők által rögzített gyorsulási diagram 15 ms-os intervallumára vonatkozik a kiszámított HIC érték, melyek az alábbiak szerint kerülnek értékelésre a töréstesztek alkalmával [39] :

- Az Egyesült Államokban (NHTSA, 2000) szerint a HIC_{15} (a fej gyorsulási függvényének 15 ms-os intervallumában számított) nem haladhatja meg a 700-as értéket.
- Az Insurance Institute for Highway Safety (IIHS) „elfogadható” besorolásához a járműnek szintén 700 alatti HIC_{15} értékkel kell rendelkeznie, ennek túllépése már „rossz” vagy alacsonyabb minősítést eredményez.
- Az Euro NCAP a következő HIC_{15} -ös határértékekkel rendelkezik a gyalogosok védelmére vonatkozóan:
 - Zöld: $HIC_{15} < 650$
 - Sárga: $650 \leq HIC_{15} < 1000$
 - Narancs: $1000 \leq HIC_{15} < 1350$
 - Barna: $1350 \leq HIC_{15} < 1700$
 - Piros: $1700 \leq HIC_{15}$

Bár a HIC pontos határértéke változó, a legtöbb szabályozás és minősítési rendszer elfogadhatatlannak és potenciálisan életveszélyesnek tartja az 1000 feletti HIC_{15} -öt [39].

Mivel a járműben utazók – az ütközés okozta - terhelésének csökkentését a passzívbiztonsági rendszerek optimalizációjával érhetjük el, ezért elengedhetetlen volt az ütközés háttérében húzódó kinematikai és energiamegmaradási törvények és összefüggések megismerése, amely a következő fejezetben kerül részletezésre.

2.2 Az ütközések kinematikája

Ahhoz, hogy érdemi fejlesztői munkát végezhessünk a passzívbiztonsági rendszeren és a fent részletezett személyi sérülések tekintetében is javulást érvényesítsünk, fontos megismerni és megérteni az ütközés pillanatában lezajló energia folyamatokat. Számos más műszaki tudományterülethez hasonlóan a passzívbiztonsági eszközök működésének alapját is az energia megmaradás törvénye adja.

Egy jármű mozgása során mozgási energiával bír, amely egyenesen arányos annak tömegével és négyzetesen függ a mozgás sebességétől. Meghatározásához az alábbi (3) összefüggést alkalmazzuk, ahol m a jármű tömegét jelenti kg-ban megadva a v pedig a sebességét m/s mértékegységben [40-41]:

$$E_{kin.} = \frac{1}{2}mv^2 [J] \quad (3)$$

Az ütközés pillanatában az így felgyülemlett energia ütközési energiává alakul, melynek egy része a karosszérián deformációt idéz elő, másik része pedig hő és akusztikus energia formájában jelenik meg. Ez utóbbiak a passzívbiztonsági rendszerek és gyakran a baleseti elemzések alkalmával is elhanyagolhatók, vagyis az ütközés pillanatát megelőző mozgási energia ($E_{kin.}$) megegyezik az ütközési energiával ($E_{imp.}$) (4),(5) [40-41].

$$E_{kin.} = E_{def.} + E_{hő} + E_{akk.} [J] \quad (4)$$

$$E_{kin.} = E_{imp.} [J] \quad (5)$$

Az ütközéskor, a karosszéria elemeiben kialakuló deformációt az F erő, az s szakaszon végzett munkája idézi elő, vagyis szorzatukkal kifejezhető az ehhez szükséges energia (6) [40-41].

$$E_{kin.} = E_{def.} = F \cdot s [kJ \cdot mm] \quad (6)$$

A jármű mozgási energiája a deformációs munka révén megszűnik, vagyis lassulást szenved el, sebessége nulla lesz. Newton törvénye értelmében egy test gyorsulása (jelen esetben lassulása) egyenesen arányos a rá ható erővel és fordítottnan arányos annak tömegével, ahol az F erő a test impulzusának (P) ($m \times v$) egységnyi időintervallumra vetített változását fejezi ki. Vagyis az összefüggés megmutatja, hogy minél nagyobb egy testre ható erő, annál nagyobb a test lendületében bekövetkező változás (7),(8) [40-41].

$$a = \frac{F}{m} \left[\frac{N}{kg} \right] \quad (7)$$

$$F = \frac{dP}{dt} [N] \quad (8)$$

2.2.1 Reakció idő szerepe az ütközés kimenetében

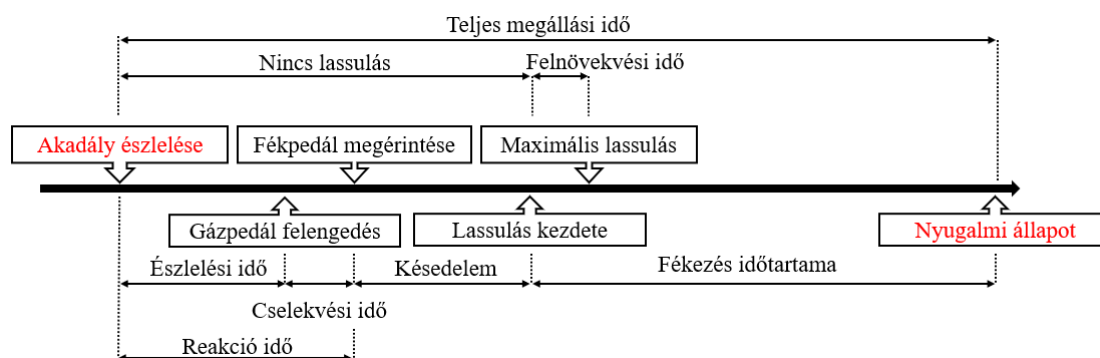
A közúti balesetek jelentős részében az ütközés pillanatában a járművek a fent ismertetett reakcióidőtől függően ugyan de már fékezett állapotban vannak, ez azt jelenti, hogy sebességük csökken ráadásul energiájukat a légellenállás és a gördülési ellenállás is csökkenti. Általános esetben tehát a sebesség és a tömeg is lehet időtől függő mennyiség. Ez a Newtoni összefüggésben (9) a következőt jelenti [41]:

$$F = \frac{dP}{dt} = \frac{d}{dt}(mv) = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt} = m \cdot a + v \frac{dm}{dt} [N] \quad (9)$$

Egyszerűbb, a ütközés kinematikájában is használatos alakot kapunk, ha feltételezzük, hogy a tömeg állandó (10), azaz :

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt} [N] \quad (10)$$

Ahol, az m az ütközésben részt vevő objektum tömegét jelöli kg-ban megadva, dv/dt pedig a sebesség időbeni változását, vagyis a lassulását fejezi ki m/s^2 mértékegységben. Az összefüggések értelmében kijelenthető, hogy a passzív biztonsági rendszerek célja az ütközés időbeli lefolyásának növelése és a lehető legnagyobb mennyiségű mozgási energia abszorpciója deformáció által. Tömegoptimalizáció eszközével is jelentős eredmények érhetők el, hiszen a fenti képletek alapján könnyen belátható, hogy a kisebb tömeg jelentősen kisebb mozgási és ezáltal ütközési energiát jelent. Ráadásul a tömegnek a maradvány (ütközés utáni) sebességek, tekintetében is kitüntetett szerepük van [42], [KJ117]. A reakció idő fontosságát pedig az alábbi 6. ábra szemlélteti.



6. ábra A reakció idő szerepe a fékezési és az ütközési folyamatban (Saját szerkesztés [41] alapján)

2.2.2 Az ütközés típusai

Ütközés szempontjából megkülönböztetünk elasztikus, teljesen rugalmatlan és rugalmatlan ütközést, melyek között a lendület és mozgási energia megmaradás törvénye tesz különbséget. Egy zárt rendszer teljes impulzusa konstansnak tekinthető, függetlenül attól, hogy

az ütközés éppen rugalmas vagy rugalmatlan. Fontos, hogy két test ütközése esetén a rendszer impulzusa nem változik, hiszen az bármely test lendületet veszít, azt elnyeri a másik, vagyis az teljes impulzus nem változik az ütközést követően sem [42]. A lendület megmaradás az alábbi összefüggésekkel értelmezendő (11), (12), (13):

$$P_{rendszer} = m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 [N \cdot s] \quad (11)$$

$$P_{rendszer} = P'_{rendszer} [N \cdot s] \quad (12)$$

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = m_1 \cdot v'_1 + m_2 \cdot v'_2 \quad (13)$$

Ahol az m_1 és m_2 a járművek tömegét a v_1 és v_2 pedig azok ütközés pillanatbeli sebességét jelöli. Amikor egy test egy másik testnek ütközik és visszapattannak egymásról az ütközést rugalmasnak tekintjük. Egy kereszteződés előtt várakozó járműnek való hátulról ütközés tekinthető rugalmas ütközésnek, hiszen az elől lévő jármű elmozdul a hátulról érkező jármű pedig lassul és megáll, feltéve, ha az elől lévő jármű nincs teljesen fékezett állapotban az ütközés pillanatában [44].

Fontos megemlíteni azonban, hogy amennyiben a két jármű mozgási energia különbsége olyan mértékű, hogy az a lökhárító rendszer merevsége már nem képes azt fedezni, és maradó deformációt szenved, az ütközés már nem tekinthető rugalmas ütközésnek. Ennek egyik tipikus, és jelen kutatás szempontjából fontos esete a teherautó hátsó aláfutás gátlójának való nagysebességgel történő személyautó ütközése. Ebben az esetben már nem történik meg az elől lévő jármű, tehát a teherautó elmozdulása, ellenben az ütköző jármű mozgási energiája ütközési energiává alakul és az ütközéskor fellépő erő a karosszérián deformációs munkát végez. Ez azt jelenti, hogy a két jármű az energiahatások végett összeragad ezért azonos, jelen esetben nulla sebességgel rendelkeznek. Frontális ütközés esetén ez akár ellentétes irányba való haladást is jelenthet, vagyis a kisebb energiájú járműben utazók nem csak drasztikus lassulást, de az ellentétes irányba való gyorsulást is elszenvedik (14).

$$v_{maradvány} = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (14)$$

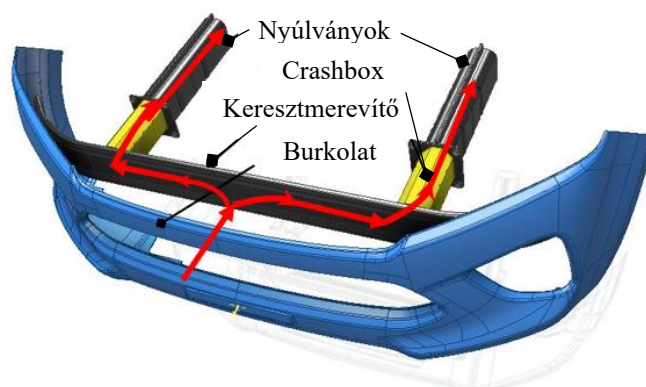
Sajnos az elektromos hajtásmódra való átállással és a nagyobb, kényelmesebb járművek iránt növekvő igény miatt a személygépjárművek önsúlya jelentősen emelkedett az elmúlt években [45][KJ126][KJ121][KJ117]. Azonos márkát és típust alapul véve az elektromos és hagyományos hajtáslánccal rendelkező modelleket összehasonlítva akár 5-600 kg többlet súlyt realizálhatunk az elektromos változat javára. Ezek a többletsúlyok egy teljesen rugalmatlan ütközés esetén egy kisebb tömegű járműben utazókra nézve komoly veszélyforrást jelent. A fent részletezett HIC értéket alapul véve egy 500 kg többletsúlyú járművel való ütközés

nagyságrendileg 20-30%-os HIC növekményt jelent, amely már minimum egy AIS csoporttal nagyobb besorolást von maga után [46][KJ116]

3. Lökhárító rendszerek

A passzívbiztonsági rendszerek célja a már bekövetkezett balesetek következményeinek csökkentése mind a személyi sérülésre, mind pedig a műszaki károkra vonatkozóan. A magyar feltaláló, Barényi Béla nevéhez fűződő gyűrődő zóna mai nap alkalmazott konstrukciós megoldás, miszerint a jármű utascellának olyan merevnek kell lenni, hogy az nagy energiájú ütközés esetén sem deformálódhat. Az ütközési energiát pedig az utascella előtt és mögött kialakított gyűrődő zónának kell elnyelnie [47-48][KJ124]. Ezeknek a gyűrődő zónáknak egyik elsődleges eleme a lökhárító rendszer, amely a járművek hossznyúlványainak végén helyezkednek el a jármű elején és hátulján. A nyúlványhoz történő rögzítésük szerelhetőségi követelmények miatt csavarkötéssel megoldott.

A lökhárító rendszer több részre különíthető el funkciójuk szerint. A fent említett csavarkötés talplemezen, vagy rögzítő lemezen keresztül történik, amely segíti a jármű karosszéria nyúlványához való pontos illesztést. A talplemezekeken hegesztéssel rögzített energia elnyelő, gyűrődő dobozok, úgynevezett crashbox-ok találhatók. A két oldalt egy keresztgerenda köt össze, melynek elsődleges szerepe a kellő merevség biztosítása és az energia közvetítés és disztribúció a crashbox-ok felé. A funkciója miatt keresztmerevítő kifejezést is használja a szakirodalom. Gyakran alkalmazott megoldás a keresztgerenda, többnyire poliuretánból készült abszorberrel való burkolása, amely az energia abszorpcióban vesz részt. Rögzítése ragasztással, vagy szilárd illesztéssel történhet. A lökhárító rendszer szerkezeti felépítését és a legfontosabb alkatrészeket szemlélteti a 7. ábra.



7. ábra Lökhárító rendszer felépítése [KJ118]

A lökhárító rendszer, ahogy a bevezetésben is bemutatásra került olyan merevséggel kell, hogy bírjon, hogy 8 km/h alatti sebességű ütközés esetén nem alakulhat ki maradó deformáció benne.

Az energia elnyelés ebben az esetben, a fent említett, a lökhárító kereszt gerendájára rögzített kiegészítő abszorber és egyéb külső burkolati elemek plasztikus deformációja révén valósul meg. A lökhárító rendszer egészének olyan energia abszorpciós teljesítménnyel kell rendelkeznie, hogy 16 km/h ütközési sebesség alatt a jármű hossznyúlványa plasztikus deformációt nem szenvedhet el [49-51]. Ennek oka, hogy a nyúlványok helyreállítása és javítása költséges és időigényes folyamat, a csavarkötéssel rögzített lökhárító rendszer cseréjéhez viszonyítva. A lökhárító biztonságtechnikai megfelelőségét alkalmassági tesztekkel ellenőrzik és igazolják, így az alacsonysebességű ütközésre optimalizált passzívbiztonsági rendszerek tervezésénél több törvényi rendelkezés előírásait is alapul kell venni. Az ide vonatkozó előírások az UN ECE R42, FMVSS-581 és az IIHS (Insurance Institute for Highway Safety) Bumper Test Protocol [52-53]. Passzívbiztonsági konstrukciók fejlesztésénél nem csak az adott szerkezet sérülékenysége, hanem annak javíthatósága is fontos figyelembe veendő szempont. A személygépkocsik szerkezetének alacsony sebességű ütközések során bekövetkező szükségtelen károsodásának megelőzése érdekében vezették be a 15-16 km/h sebességű és 40 %-os átfedéses ütközésvizsgálatot, amelyet folyamatosan módosítanak, hogy az aktuális közlekedés kondícióhoz legyen igazítva. A járművek önsúlyának növekedése, a nagytömegű elektromos járművek és városi terepjárók elterjedése indokolta az ellenjármű súlyának növelését 1000-ról 1400 kg-ra [KJ121]. A járművek karosszéria sérüléseinek javítási költségeinek gyakran a biztosítók a költségviselői, ezért a fenti törvényi rendelkezésen túl a tervezés és validálás alkalmával az általuk alkotott iránymutatások is figyelembe veendők. Az Allianz az AZT lökhárító tesztet az RCAR nemzetközi munkacsoportjával közösen fejlesztette ki, és *RCAR Bumper test* (lökhárító teszt) néven került bejegyzésre. A protokoll a nemzetközi UN ECE és IIHS előírásokhoz hasonlóan rögzíti a jármű és a tesztkörnyezet kondíciókat, a teszt előkészítésének és végrehajtásának lépéseit, követelményeit [54-55].

3.1 Crashbox kialakítások, gyűrődési jellemzők

3.1.1 Crashbox-ról általában

A kutatás a lökhárító rendszer egyik kiemelt tartozékának, a crashbox-nak a konstrukciós fejlesztésével, optimalizálásával foglalkozik, ezért ebben a fejezetben irodalomkutatás alapján mutatom be ezen crashbox szerkezetek működését, előnyeit, hátrányait, és mai korszerű kiviteleit.

A crashbox, más néven gyűrődő elem, a járművek kritikus biztonsági alkatrésze, amelyet arra terveztek, hogy az ütközés során energiát nyeljen el. Általában az autó elején található, és az egyik legfontosabb ütközési energiaelnyelő eszköz. Feladatát tekintve multifunkciós, hiszen

legfőbb feladata az autóban ülők és a gyalogosok védelme azáltal, hogy ütközés közben elnyeli a kinetikus energiát, és minimálisra csökkenti az erők átadását a jármű fő szerkezetére. Mindazonáltal feladata a jármű és más alkatrészek sérülésének csökkentése, ami csökkentheti a javítási költségeket [56-58]. A crashbox szerkezeteket gyakran vékony falú fémszelvényekből készítik, amelyek olyan anyagokból készülnek, mint pl. a szénacél vagy alumíniumötvözet [59-60], [KJ117]. A közelmúltban végzett kutatások a könnyű anyagok, például alumínium fémmátrix kompozitok (MMC-Metal Matrix Composite) és szálerősítéses műanyagok (CFRP-Carbon-Fiber Reinforced Polymer) felhasználásával készült crashboxok fejlesztésére összpontosítottak az ütközési energia abszorpció javítása és a súly csökkentése érdekében. Ezek közül kiemelkedik az XPREG XC130 epoxi alapú prepreg rendszer, amelyet kifejezetten szerkezeti célú CFRP-alkalmazásokhoz fejlesztettek, így nagy szilárdságú, ugyanakkor alacsony tömegű szerkezetek létrehozását teszi lehetővé [61]. Hasonlóan, más CFRP-anyagokat, mint például a HexPly® M77 prepreg rendszert vagy a Toray T700/2510 prepreg kombinációt is gyakran alkalmazzák az autóiipari ütközésvédelmi komponensek fejlesztésében [62]. Egy másik ígéretes kutatási irány az úgynevezett hibrid kompozit anyagok alkalmazása. Ma és társai (2020) egy alumínium és CFRP hibrid anyagú crashbox szerkezet energia abszorpciós képességét vizsgálta, ahol kiemelkedő fajlagos energia abszorpciós értékről számolnak be [63]. Az crashbox kialakítása kritikus fontosságú, mivel egyensúlyban kell lennie az ütközésbiztonsági követelményekkel, a súlycsökkentéssel és a gyártási korlátokkal, ezért komplex mérnöki gondolkodást igényel annak tervezése és/vagy optimalizációja. A crashbox abszorpciós teljesítményét befolyásoló tényezők közé tartozik az energiaelnyelő szerkezet alakja, a falvastagság és az anyagtulajdonságok. A feltörekvő technikákat, például a gépitanulást is használják az ütköződobozok tervezésének optimalizálására az ütközési viselkedés pontos előrejelzésével és egy szélesebb tervezési terület feltárásával az innovatív megoldásokhoz való közeledés érdekében [64-66]. Vékonyfalú szerkezetnek tekinthető egy konstrukció, ha annak falvastagság és a szerkezet szélességi és magassági dimenziójának aránya alacsony. A tömegoptimalizáció igénye miatt ezen szerkezetek teherviselő képessége elsősorban a szelvény geometriájának optimalizációjával növelhető. Azonban számos tanulmány vizsgálja a különböző anyagok, geometriák és kialakítások, például habtöltésű szerkezetek, összetett keresztmetszetek és hibrid szerkezetek használatát az energiaelnyelés és a deformációs jellemzők javítása érdekében [67-71], [KJ117].

3.1.2 A gyűrődési mechanizmus folyamata

Az ütközés pillanatában a jármű mozgási energiája ütközési energiává alakul, amely az energia elnyelő elemek axiális irányú terhelését okozza. Amennyiben ez a terhelés meghaladja a szerkezet merevségi teljesítményét és az ütközési energia nagyobb, mint amennyit a szerkezet elasztikus képességből adódóan elnyelni képes, plasztikus deformáció következik be. Az elasztikus és plasztikus deformáció együttese határozza meg a szerkezet energiaelnyelő képességét. Számos kutatás foglalkozik a vékonyfalú szerkezetek axiális terhelés okozta lineáris elasztikus viselkedésével, amelyek leírást adnak arról, hogy egy rugalmas, reverzibilis deformációról van szó, amely egy tranzienst állapotot eredményez, hiszen a terhelés megszűnését követően a szerkezet visszanyeri eredeti alakját [72-73]. Rugalmas testnek nevezzük a kontinuumot, ha mozgása során a feszültségtenzor a kontinuum minden egyes pontjában egy értelmű függvénye az alakváltozási tenzornak, ahol az anyag rugalmassági modulusa teremt kapcsolatot a belső feszültség és az általa okozott alakváltozás között, amelyet az alábbi Hooke-törvény (15) fejez ki [74].

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \quad (15)$$

ahol ε_x az x-irányú alakváltozás, σ_x az x-irányú feszültség és E a Young-modulus. Az egytengelyű terhelés a másikban két irányban is deformációt okoz, amely már a Poisson-tényező (ν) figyelembevételével határozható meg (16) [74].

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\nu \varepsilon_x \quad (16)$$

Az (15) és (16) egyenleteket kombinálva megkapjuk az alábbi általános Hooke-törvényt, amely figyelembe veszi a Poisson-féle keresztirányú alakváltozást (17) [74]:

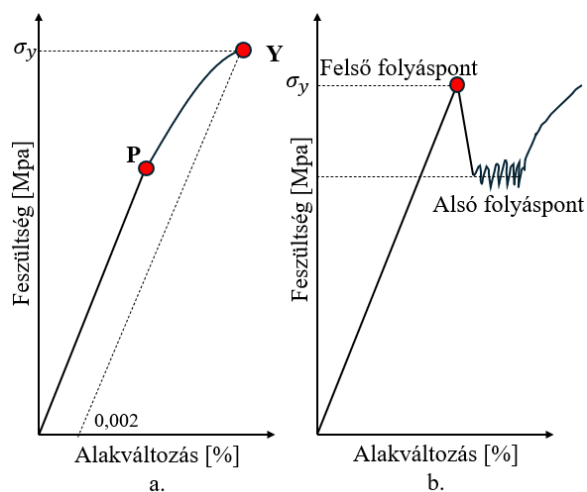
$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (17)$$

A nyíróvizsgálatok jelleggörbéi alapján meghatározott feszültségig a következő lineáris kapcsolat áll fenn a nyírófeszültség és a szögtorzulás között (18) [74]:

$$\tau = G\gamma \quad (18)$$

ahol τ és γ a nyírófeszültség és a nyúlás, illetve a G az anyag csúsztató rugalmassági modulusa. Az 8.a ábrán látható feszültség-alakváltozási diagram szerint a P pont előtt az anyag a rugalmassági deformációs szakaszában marad, vagyis a terhelés megszűnése esetén az visszanyeri eredeti alakját. Sajnos elég nehéz megtalálni az arányossági határ pontos értékét, és nincs drasztikus elmozdulás a rugalmas és a képlékeny viselkedés között, ezért a tapasztalatok arra vezettek, hogy egy olyan Y pontot használjunk, amelynél a legtöbb anyag esetében folyásjelenség következik be. Az abszcisszára általában 0,002-es eltolást alkalmazva, a

rugalmas egyenessel párhuzamost húzva, a feszültség-alakváltozás görbe és ennek az egyenesnek a metszéspontjában kapható a felső folyáspont. A pont ordinátájának megfelelő érték a folyáshatár, amelyben kis mértékű képlékeny alakváltozás jelenik meg, de mérnöki célokra széles körben használható. A felső folyáshatár tehát az a maximális feszültségszint, amelynél az anyag plasztikusan deformálódni kezd, vagyis a crashbox-ok esetén megindul az ütközési energia abszorpció. Sok olyan anyag létezik, amelynek feszültség-alakváltozás görbéjén (8.b ábra) egyértelmű átmenet van a rugalmas és a képlékeny viselkedés között. Ebben az esetben a felső folyáshatárhoz hasonlóan definiálható egy alsó folyáshatár is, amely a felső folyáshatár túllépése után következik be. Ez a pont az anyag plasztikus deformálásához szükséges feszültségcsökkenést jelenti. Ahogy a diszlokációk mozogni kezdenek, és legyőzik az oldott atomok reteszelő hatását, a deformáció fenntartásához szükséges feszültség csökken. Az alacsonyabb folyáshatár azért fontos, mert a képlékeny alakváltozás egyenletesebb eloszlását jelzi az anyagban, lehetővé téve a folyamatos deformációt alacsonyabb feszültségi szinten [56].



8. ábra Felső és alsó folyáshatár értelmezése (Saját szerkesztés [49] alapján)

Crashbox-ok esetében a lineárisan elasztikus szakasz egy csúcserőben ($F_{\max}$) végződik, ami a szerkezeteket jellemző egyik legfontosabb mutatószám. A csúcserő és a crashbox folyási értéke közötti összefüggés az, hogy a csúcserő az a maximális erő, amelyet az crashbox ütközéskor elszenved, míg a folyáshatár az az erő, amelynél az ütköződoboz plasztikusan deformálódni kezd. A csúcserőt ideális esetben minimálisra kell csökkenteni, hogy a képlékeny alakváltozás minél hamarabb meginduljon, és a lehető legnagyobb mértékben elnyelje az ütközési energiát anélkül, hogy az ütközéskor fellép erőhatást a jármű utasterének továbbítaná. A folyáshatár tehát a crashbox anyagának szilárdságát és a konstrukció energia abszorpciós működésbe lépésének kezdetét mutatja. A nagyobb folyási feszültség ugyan merevebb

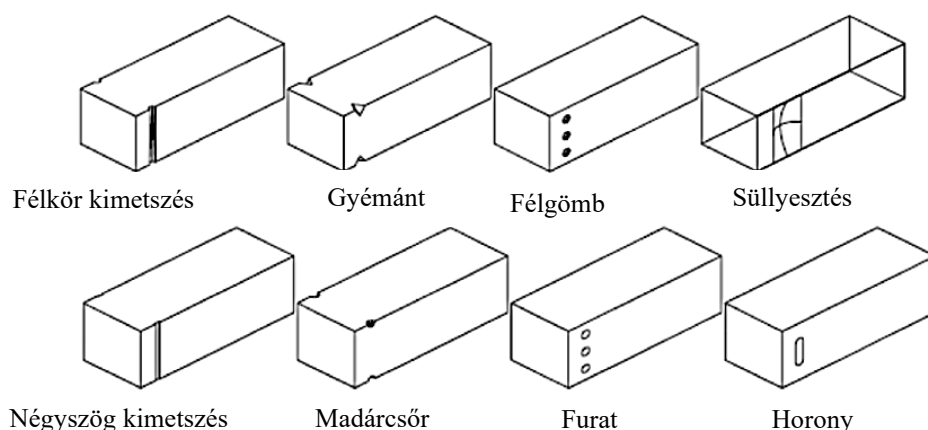
energiaelnyelőt jelent, de ezáltal magasabb csúcserőt is eredményez [49], [56]. A plasztikus deformáció a fent említett UN ECE R42 és RCAR Bumper test előírások alapján 8 km/h alatti sebességű ütközésnél nem jelenhet meg [51], [52], [54]. A crashbox-okra vonatkozó csúcserő felső határértékét a jármű nyúlványának merevsége határozza meg, hiszen az energia elnyelők plasztikus deformációjának küszöbértéke minden esetben alacsonyabbnak kell, hogy legyen, mint a nyúlványok merevsége. Ellenkező esetben plasztikus deformáció hamarabb jelenne meg a jármű alvázában, mint az energia elnyelőkben, amelyet a már fent említett törvényi rendelkezések is korlátoznak.

3.2 Csúcserőt befolyásoló alakoptimalizációk

A vékonyfalú szerkezetek falvastagsága és a plasztikus deformáció között lineáris összefüggés figyelhető meg. Az összefüggés értelmében falvastagság csökkentése magával vonja a plasztikus deformáció megjelenéséhez tartozó küszöbérték csökkenését, amelyet számos tanulmányban is olvasható eredmények igazolnak [75-77]. A kutatások viszont arról is beszámolnak, hogy a falvastagság természetesen szoros összefüggést mutat az adott vékonyfalú szerkezet energia elnyelő teljesítményével is. A tömegoptimalizáció és a csúcserő optimalizáció szempontjából ugyan előnyös a csökkentett falvastagság hiszen alacsonyabb szerkezeti merevséget eredményez, ugyanakkor kevesebb energia elnyelésre képes a plasztikus deformáció során [78]. A csúcserő optimalizáció ezért nem minden esetben a falvastagság módosításában keresendő, hanem a gyűrődési viselkedést nagymértékben befolyásoló alakoptimalizációban. Számos kutatás foglalkozik a gyűrődési jellemzőket befolyásoló alaksajátosságokkal és kiegészítő kialakításokkal [79-81]. Az alakoptimalizáció több csoportra bontható, ezek lehetnek keresztmetszet típusára vonatkozó idealizálások, a hosszdimenzió mentél alkalmazandó alaksajátosságok, mint pl. kúpos kialakítások és gyűrődést segítő bordák elhelyezésével kapcsolatos optimalizációk vagy a felsoroltak együttes alkalmazása. A crashbox optimalizációs kutatások legtöbbször az "origami" elven alapulnak. Az "origami" szó az ősi Japán papírhajtogatás művészetét összefoglaló kifejezés, azonban az "origami" hajtogatása mögött bonyolult matematikai összefüggések és törvényszerűségek állnak. Ezt a technikát az ütközésbiztonság tudományán belül több alkalmazási területen használják, mint például a repülés- és űrhajózásban, az orvostudományban és az autóiparban egyaránt [82]. A hagyományos crashbox energia elnyelők négyzet alakú szelvényekből, vagy kör keresztmetszetű csövekből készülnek, ehhez képest az "origami" elvet követő változatok már olyan alaksajátosságokat alkalmaznak, amelyek egy előre jól definiálható roncsolódási képességgel teszik jellemezhetővé a konstrukciót. Az origami elmélet alapgondolata az, hogy

az ütközés során egy olyan, úgy nevezett szuperhajtogatott konstrukciót kapjunk, amely a hagyományos négyzet alakú szelvénynél jobb energia abszorpciót biztosít, és idealizált gyűrődési karakterisztikával bír. A csúcserőn túl a plasztikus deformációhoz szükséges erő fluktuáció is kritikus jellemző az energia elnyelők minősítésénél. Az „origami” elv erre a problémára is megoldást jelenthet [83-84]. Azonban az „origami” elvet követő fejlesztése eredménye legtöbbször olyan összetett alakzat, melynek gyárthatósága problémás és költséges, ezért célra vezetőbbnek gondolom a hagyományos szelvények konstrukciós optimalizációját. Ennek egyik eszköze a gyűrődést segítő, ezáltal csúcserőt csökkentő úgynevezett geometriai tökéletlenségek alkalmazása a crashbox-ok palástján, amelyek geometriai eszközök lehetnek bordák, furatok, beszúrások, élettörések és lekerekítések, különböző lyukasztások és madárcsőr kialakítások, valamint ezek kombinációi. A bordázatok kialakítását tekintve a pozitív és negatív bordakialakítást különíthetjük el. A pozitív változat esetében a crashbox palástjából kiemelkedő bordákat hoznak létre, míg a negatív kialakítással a palást külső síkjához viszonyítva süllyesztett bordákat alkalmazunk. A bordázatok típusainak további értelmezése az 7. fejezetben kerül bemutatásra.

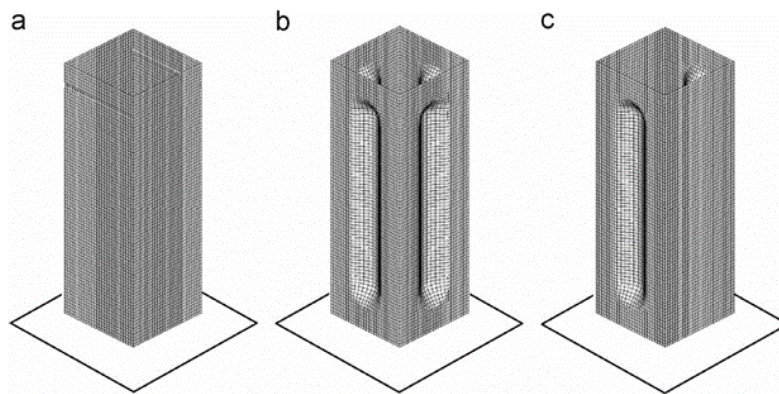
A nemzetközi szakirodalom „crash initiator” vagyis „gyűrődést indító” kifejezést használja ezen módszer alkalmazására, hiszen a plasztikus deformáció küszöbértéke nagymértékben függ ezen geometriai „tökéletlenségek” alkalmazásától [85-86]. Alkalmazott kifejezések még a nemzetközi szakirodalomban a „trigger”, mint indító és a „stress concentrator”, mint feszültség koncentráló, amelyek rendkívül jól leírják ezen konstrukciós megoldások funkcióját, ahogyan azt Köseadağ [87] is használta crashbox optimalizációról szóló tanulmányában. Hiszen a cél olyan feszültséggyűjtő helyek kialakítása a szerkezet mentén, ahol az anyag képlékeny alakváltozása hamarabb megindul, ezáltal megkezdődik az ütközési energia abszorpciója deformációs munka révén. Bármely feszültség gyűjtő kialakításról is legyen szó, a „gyűrődést indító” geometriai megoldások hatással vannak a kezdeti csúcserőre, az erő fluktuációra és az energia abszorpció teljesítményre [88]. A leggyakrabban alkalmazott törésindító megoldásokat az 9. ábra szemlélteti.



9. ábra Feszültséggyűjtő megoldások [88]

Kumar [89] numerikus vizsgálatot végzett a madárcsőr típusú, az élen kialakított gyémánt formájú süllyesztés és a párhuzamos hornyokra vonatkozóan, hogy információt kapjon ezen geometriai módszerek a gyűrődési tulajdonságokra gyakorolt hatásáról téglalap keresztmetszetű crashbox-okra vonatkozóan. Megállapításra került általa, hogy a csúcserő minden konfigurációban csökken, míg az energia abszorpció csak a madárcsőrös gyűrődés indítók esetében nő. Az eredmények szerint a csúcserő 7%-kal, 12%-kal és 37%-kal csökken, a madárcsőr esetében pedig az energiaelnyelés 6%-kal nő, de a másik két geometria esetében 9%-os csökkenést észleltek. Az erőfluktuáció és gyűrődési hatékonyságról azonban nem számol be, ahogy több különböző gyűrődést segítő megoldás együttes alkalmazásáról sem.

Egy másik konfigurációt javasolt és elemzett Zhang [90], aki több numerikus vizsgálatot is végzett negatív típusú horonnyal optimalizált vékonyfalú szerkezeten az 10. ábrán látható módon. Az eredmények a hagyományos négyszögletes konstrukciókhoz képest jelentősen megnövekedett energia abszorpciós értéket mutattak, és a csúcserő is csökkent egyes konfigurációk esetében. A tanulmány átlagos 9%-os csúcserő csökkenésről számolt be, energia abszorpciós teljesítmény növekedése mellett, azonban tanulmány nem tér ki arra, hogy ez a típusú törésindító, hogyan hat más keresztmetszet típusokra.



10. ábra Zhang által vizsgált feszültséggyűjtők (a. alap konstrukció; b. minden oldalról hornyolt; c. szemközti oldalak szimmetriája) [90]

Mamalis [91] szintén egy átfogó tanulmányt készített, amely numerikusan és kísérletileg is elemezte a kör alakú furatok hatását a négyszög keresztmetszetű vékony falú crashbox szerkezeteken. A vizsgálatok a furatok méretére és a paláston elhelyezésére koncentráálódtak, amely vizsgálatok alapján Mamalis [91] megállapította, hogy a furatok elhelyezkedésének hatása az oldalfalra jelentősebb csúcserő csökkenést eredményez, mint a furatok mérete. Ezen túlmenően ez az elemzés kiemelte, hogy a középmagasságban lévő furatokkal rendelkező próbatestek jobb ütközésbiztonsággal rendelkeztek, mivel ezeknél volt a legnagyobb energiaelnyelés és érdemleges csúcserő csökkenés. Az alkalmazott furatok alakváltozási stabilitásra tett hatásáról nincs információ a tanulmányban.

Egy másik gyakran alkalmazott alakoptimalizációs módszer a csúcserő csökkentésére, a crashbox hosszirányában alkalmazott kúpos kialakítás. A kutatások alapján a vékonyfalú, kúpos szerkezetek hatásosnak bizonyulnak a maximális erő csökkentésében anélkül, hogy az energiaelnyelés jelentős mértékben csökkenne [92-93]. Azonban sem ezekben sem más szakirodalmakban nem lehet olvasni egyértelmű információt arról, hogy milyen összefüggés áll fenn az alkalmazott kúpszög mértéke és a csúcserő, az erő fluktuáció és az elnyelt energia mennyisége között.

3.3 Fémhabbal integrált crashbox

Az előző fejezetben említésre került, hogy ha a terhelés eléri az alkalmazott szerkezet folyási értékét, akkor plasztikus deformáció jön létre, amely ütközésbiztonsági szempontból kiemelt fontosságú folyamat, hiszen ebben a szakaszban történik az energia abszorpció érdemi része. A plasztikus deformáció egy irreverzibilis folyamat, vagyis a terhelés megszűnése után sem rendeződik vissza az anyag kristály szerkezete. A plasztikus deformációt az azt létrehozó és utána a gyűrődési folyamatot fenntartó erő mértékével jellemezhető. Az ideális abszorber plasztikus deformációjához közel állandó zömítő erő párosul (plató szakasz), ez azt jelenti,

hogy a maradó deformáció során jelentkező erő fluktuáció egy fontos jellemzője az adott konstrukciónak.

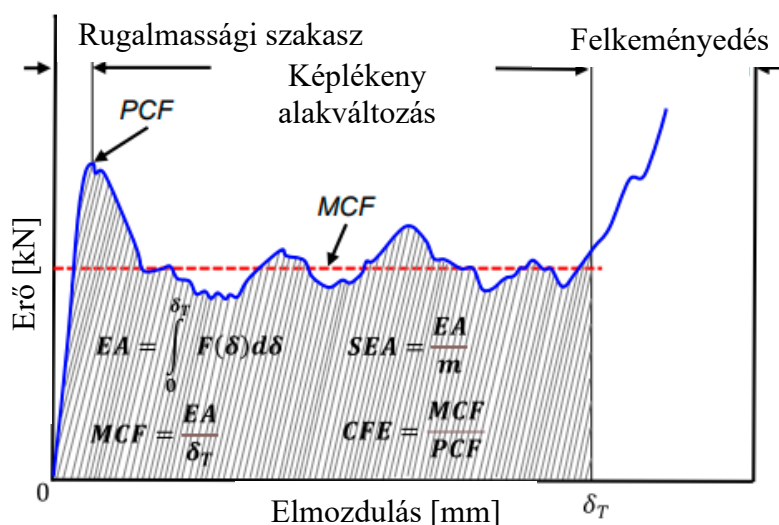
A csúcserő optimalizáció érdekében alkalmazott geometriai módszerek természetesen hatással vannak az abszorpció mértékére, azonban gyakran nem előnyösen. Nehéz megtalálni azt az ideális méretet, alakot és falvastagságot, amely valamennyi kritériumra pozitív hatással van. Ha sikerül is kititrálni egy megoldást akkor annak gyárthatóságával és előállítási költségeivel adódhatnak problémák. Ezért a legtöbb kutatás az alakoptimalizáción túl más módszereket keres a nagyobb energia elnyelési képesség elérése érdekében. Ennek egyik eszköze az anyaginteráció, amikor a vékonyfalú szerkezetet valamilyen ideális gyűrődési karakterisztikával rendelkező abszorberrel töltik meg. Ezek az abszorber töltetek lehetnek nyitott vagy zárt cellás fémhabok, lattice szerkezetek, szintaktikus kompozitok, kerámiák. A megoldás nagy előnye, hogy úgy fokozható az eredeti vékonyfalú szerkezet energia abszorpciós képessége, hogy nem növekszik jelentősen a tömege.

Djamaluddin [94] elektromos járművek ütközésbiztonságának fokozására szánt zártcellás alumínium habbal töltött crashbox-ot vizsgált a tanulmányában. A kutatásban más tanulmányokhoz eltérően csak részleges töltést alkalmazott különböző elrendezésekben. Djamaluddin arról számolt be, hogy a fémhab töltésű crashbox szerkezetek energia elnyelő képessége nem csak az alkalmazott fémhab típusától függően növelhető, hanem fontos a fémhab elhelyezkedése a szerkezeten belül. Mindazonáltal az elhelyezéstől függetlenül minden konstrukciónál tudta növelni az energia abszorpció értékét, azonban a kezdeti csúcserő értékét nem tudta csökkenteni, így az optimalizált változatok is csak 49%-os gyűrődési hatékonyságot sikerült elérnie. Mivel a vékonyfalú szerkezet és a töltet egyidejűleg zömül az általa fejlesztett konstrukcióban, ezért részleges gyűrődés esetén a teljes szerkezet cseréje szükséges.

Ezzel szemben Wang és társai [95] már olyan kísérleteket végeztek, ahol már nem csak az energia abszorpció, de a csúcserő problémája is megoldandó probléma volt. Szintén részlegesen töltött crashbox szerkezeten végezte a vizsgálatokat, amiben a próbatesteken már élen alkalmazott törésindító bemetszéseket is alkalmazott. A próbatestek további különlegessége, hogy duplafalúak voltak. A tanulmányban azt olvashatjuk, hogy 12,5%-kal tudta növelni az egységnyi tömegre vetített elnyelt energia értékét, és több mint 40%-al csökkentette a kezdeti csúcserő értékét. Ez összeségében azt eredményezte, hogy a fejlesztéssel 64%-os gyűrődési hatékonyságot sikerült elérni. Wang szerkezetében a fémhab töltet egyidejűleg zömül az azt körülvevő vékonyfalú szerkezettel, így a fémhabokra jellemző előnyös (plató) karakterisztikát nem tudta megtartani.

3.4 Mutatószámok energia elnyelő szerkezetek jellemzésére

A crashbox szerkezetek fejlesztési lehetőségei szinte korlátlanok, azonban fontos az egzakt mérőszámokkal történő jellemzés és validálás, hiszen ezek adnak lehetőséget számos konstrukció objektív összehasonlítására, és a legjobb változatok kiválasztására. Az értékelési kritériumok különböző paramétereket tartalmaznak, amelyek kulcsfontosságúak a teljesítmény és az ütközésbiztonsági hatékonyság értékeléséhez. Ezek a kritériumok direkt módon jellemzik az adott energia elnyelő konstrukciót, valamint információt ad annak a járműnek az ütközésbiztonságáról, amelyben hasznosítani szeretnénk. A crashbox értékelési kritériumai általában olyan tényezőket foglalnak magukban, mint az energiaelnyelés, a fajlagos energiaelnyelés, a csúcs- és közepes zömítő erők, a terhelés egyenletessége, erőfluktuáció és a hatékonyság. Ezek a paraméterek jelentős szerepet játszanak annak megértésében, hogy az adott crashbox mennyire képes megvédeni az utasokat az ütközés során, és milyen mértékben képes csökkenteni a baleset következményeit. A 11. ábra egy crashbox gyűrődésére jellemző karakterisztikát mutat be, illetve azokat a legfontosabb mutatószámokat, amelyekkel keresztül jellemezhető az adott konstrukció gyűrődési viselkedése.



11. ábra A gyűrődési képesség jellemzésére szolgáló paraméterek [96]

Az ütközés pillanatában keletkező ütközési energia az energia elnyelő szerkezeten deformációt hoz létre és ezáltal valósul meg annak disszipációja. A deformáció mértéke és módja határozza meg a járműben utazókra ható terhelés mértékét, tehát a cél a lehető legnagyobb mennyiségű energia abszorpció, vagyis a drasztikus lassulás minimalizálása.

Ezért az egyik legfontosabb mutatószám az elnyelt energia mennyisége (EA – *Energy Absorbing*), amely az erő-elmozdulás diagramon végzett függvény integrálásával, tehát a görbe alatti terület nagyságával fejezhető ki (19) [96].

$$EA(dx) = \int_0^{dx} F(x)dx \text{ [J]} \quad (19)$$

Fontos megjegyezni, hogy összehasonlító vizsgálatoknál az integrálás határértékeit azonosnak válasszuk meg, hiszen ellenkező esetben nem kaphatunk releváns információkat a szerkezetek teljesítményéről.

A crashbox alakoptimalizációval foglalkozó fejezetben már kifejtésre került, hogy a nagyobb falvastagság nagyobb energia abszorpciót tesz lehetővé, hiszen nagyobb energia szükséges ugyan azon geometriájú szerkezet plasztikus deformációjához. A falvastagság növelése viszont magával vonja a szerkezet tömegének növekedését, ezért fontos alkalmazni és meghatározni a fajlagos elnyelt energia mennyiségének (SEA – *Specific Energy Absorbig*) jellemzésére alkalmas mutatószámot is. Ez az indikátor az egységnyi tömegrre vetített energia értéket fejezi ki általában Joule/gramm mértékegységben kifejezve (20) [96].

$$SEA = \frac{EA}{m} \text{ [J/g]} \quad (20)$$

Egy energia elnyelő szerkezet jellemezhető a gyűrődéséhez szükséges erő középértékének (MCF - Mean Crashing Force) meghatározásával. A nagyobb középérték természetesen nagyobb abszorpciós értéket jelent egységnyi elmozdulásra kifejezve. A crashbox szerkezet deformációjához szükséges az alakváltozás során kifejtett átlagos erőre vonatkozik, amelyet úgy számíthatunk ki, hogy a teljes elnyelt energia mennyiségét (EA) elosztjuk a deformáció mértékével (δ_T). A középértéket a képlékeny alakváltozásra kell meghatározni (21) [96].

$$MCF = \frac{EA}{\delta_T} \text{ [N]} \quad (21)$$

Az előző fejezetben részletezett csúcserő (PCF vagy $F_{\max}$) és a középerő (MCF) arányával kifejezhető az adott szerkezet gyűrődési teljesítménye (CFE – *Crashing Force Efficiency*). A Crushing Force Efficiency (CFE) tehát a vékonyfalú szerkezetek energiaelnyelési teljesítményének értékelésére szolgáló mérőszám, százalékos formában kifejezve a kezdeti csúcserő (PCF) függvényében (22) [96].

$$CFE = \frac{MCF}{PCF} , [\%] \quad (22)$$

Az ideális ütközési abszorberok plasztikus deformációja közel állandó erőérték mellett történik, vagyis alacsony a zömítő erő fluktuációja, amelyet a szakirodalom plató szakaszként definiál. Ez energia abszorpciót és ezáltal a lassulási paramétereket is nagymértékben meghatározza, ezért szükséges a plasztikus deformáció egyenletességét kifejező erő fluktuációs

érték (ULC – Undulation of Load Carrying Capacity) meghatározása. Számítása a ténylegesen elnyelt energia és a középérőn számított energia hányadosával fejezhető ki [97]. A cél a minél alacsonyabb ULC érték (23) elérése, hiszen az alacsony érték nagyobb alakváltozási stabilitást jelent a zömítés során.

$$ULC = \frac{1}{EA} \int_0^d |F(x) - F_m| dx [-] \quad (23)$$

A törésvizsgálatoknál kapott diagramok zömítési erő fluktuációja az ULC (23) értéken kívül jellemezhető a szórás (STDEV – Standard Deviation) (24) és a relatív szórás (RSD – Relative Standard Deviation) (25) meghatározásával is. A szórás az átlagos középértéktől való eltérést fejezi ki, még a relatív szórás a szórás és a középérték hányadosát fejezi ki. Ezáltal a szórás mértékegysége megegyezik az eredeti mért adat mértékegységével, míg a relatív szórás százalékos értékben szolgáltat eredményt [98].

$$STDEV = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (24)$$

$$RSD = \frac{STDEV}{MCF} 100 [\%] \quad (25)$$

A crashbox szerkezetek ütközési energia abszorpciója annak rugalmas és plasztikus deformációja révén valósul meg. Azonban ütközésbiztonsági szempontból az érdemi abszorpció a plasztikus deformációs szakaszban kell, hogy történjen, ezért is szükséges a kezdeti csúcserő minimalizálása, hogy a maradó deformáció, és ezáltal az energia elnyelés minél hamarabb induljon meg. A plasztikus deformációs szakasz energia hányada (CP – Plastic Energy Ratio) kifejezhető a szerkezet teljes deformációs energiája és a plasztikus deformációs szakaszban elnyelt energia hányadosával (26) [96], [97].

$$CP = \frac{E_p}{EA} \cdot 100 [\%] \quad (26)$$

4. Zártcellás alumínium habok

4.1 Fémhabokról általában

Az energia hatékonyabb közlekedés egyik lehetősége a járművek önsúlyának csökkentése, vagyis a tömegoptimalizáció. Kezdetben az acél szerkezeteket felváltották a könnyűfémek, majd már napjainkban a szálerősítéses műanyagok és kompozitok is egyre nagyobb arányban találhatók meg a járművekben [99]. Ezen anyagok alaksajátosságoknak és a szálerősítéseknek köszönhetően olyan merevséggel bírnak, amelyek alkalmassá teszi őket

teherviselő alkatrészek, vagy akár komplett karosszéria szerkezetek előállítására. Azonban hátrányos tulajdonságuk, hogy ütközésbiztonsági gyűrődő zónában használatos nagy plasztikus deformációra alkalmas alkatrészekként nem alkalmazhatók [99], [100]. Ezért olyan alternatív anyagot kell keresnünk, amely alacsony tömeggel rendelkezik, viszont magas a deformációs képessége, vagyis ütközési energia elnyelésére alkalmas. Ezen kívül a könnyű gyárthatóság és megmunkálhatóság, az újrahasznosíthatóság és az integrálhatóság, tehát más anyagokkal való együttes alkalmazhatóság is fontos szempont. Ezeknek a követelményeknek az együttes kielégítésére a porózus szerkezetű anyagok lehetnek alkalmasak. A porózus szerkezetű anyagok struktúráját a természet ihlette, hiszen a természetben számos olyan anyag található, melynek szerkezete cellás szerkezetű. Ilyen a fa, a szivacs, de ilyen például az emberi koponya és combcsont is [101]. Porózus szerkezet fémekre vonatkozóan is létrehozható, ezek az úgynevezett fémhabok. A fémhabok alkalmazási területe egyre szélesebb, hiszen a habosítás során gyakran újszerű, az ismert és gyakran alkalmazott anyagokhoz képest szokatlanul eltérő, előnyös mechanikai tulajdonságokat kaphatunk. Fémek vonatkozásában így juthatunk magas szilárdságú, kiváló energia abszorpciós anyagokhoz, amelyek a műanyagokhoz képest magas hőmérsékleti tartományban is képesek előnyös tulajdonságaik megtartására, ráadásul toxikus gázok kibocsájtása nélkül [102]. Ezeken felül kiváló hangelnyelők, alkalmazhatók elektromágneses árnyékolásra és rezgéscsillapításra is, mindazonáltal a fémhabok száz százalékban újrahasznosíthatók is, amely egy kiemelt szempont a tervezés során. Mindezt figyelembe véve a fémhabok, és azon belül is az alumínium habok egyik fő alkalmazási terület a járműipar, ahol ütközésienergia-elnyelőként az autók lökhárítójában és ajtajainak belsejében, vagy merevítésként például küszöbök belsejében használhatók. Ezáltal nemcsak az utasok védhetők hatékonyan, de jelentős súlycsökkenés – és ezáltal üzemanyag-megtakarítás – is elérhető. Rezgéscsillapító tulajdonságukat pedig motor és váltók bakokba való integrálásakor használhatjuk ki [103].

A fémhaboknak az itt felsoroltakon kívül is számos alkalmazási lehetősége ismert, ezek még intenzívebb elterjedését azonban egyelőre több tény is akadályozza. Hiszen bár számos gyár foglalkozik fémhabok gyártásával, és meglehetősen sok kutatás vizsgálja az előállított habok tulajdonságait – sok alapvető kérdés még mindig nem tisztázott. A fémhabok mechanikai, akusztikus, elektromos, tulajdonságait alapvetően a habot alkotó szilárd fázis tulajdonságai; a szilárd fázis térfogati hányada, vagyis a relatív sűrűség; valamint a szilárd fázis térbeli elrendeződése, azaz a fémhab szerkezete határozza meg [104-106]. Ezek közül a legnagyobb kihívást a fémhab konzisztens szerkezetének elérése, és az esetleges cellahibák kialakulásának magyarázata és modellezése jelenti.

A fémhabok definiálásakor különbségek kell tenni több különböző, a köznyelvben fémhabnak nevezett anyag között. Ezek a celluláris fémek, a porózus fémek, a szilárd fémhabok és a fémszivacs. Celluláris kifejezés olyan fémtestre utal, amelyben gázzal telt üregek találhatóak. Tehát a fémfázis az anyagot cellákra osztja fel, amely cellákban gázfázis található. Ezzel szemben a porózus fémek a celluláris fémek egy alcsoportja, melyek egyféle üreg típusra koncentrálódnak. Egy másik csoportja a celluláris fémeknek a szilárd fémhabok csoportja, amelyek definiált morfológiával rendelkező anyagnak tekinthetők, hiszen folyékony fémhabokból keletkeznek. A cella általában zárt, kerek vagy polihedrális és vékony fémréteg határolja. A fémszivacsok a celluláris fémek morfológiájának egy fajtája, melyben az előzőkkel ellentétben már nyitott cellák jellemzik [107].

A fémhabok egyik legfontosabb mechanikai tulajdonsága a mechanikai energia abszorpciós képesség, vagyis hogy milyen mértékben képesek elnyelni az ütközés során fellépő energiát. Ez különösen fontos, ha energiaelnyelő szerkezetekben, például járművek gyűrődőzónáiban alkalmazzák őket. Az energiaelnyelő képesség mellett azonban a sűrűség, illetve a porozitás is kiemelt szerepet játszik. Alacsonyabb sűrűség mellett a hab könnyebb, de jellemzően kevesebb energiát képes elnyelni. Ezért az energiaelnyelés hatékonyságát gyakran a SAE értékkel jellemzik, amely az egységnyi tömegre vetített elnyelt energiát mutatja (20. egyenlet). Ez sokszor informatívabb, mint a puszta energiaérték. A cél tehát az, hogy olyan porozitású fémhabot válasszunk, amely elegendő energiaelnyelésre képes, de nem növeli túlzottan a szerkezet tömegét vagy a helyigényt. Mivel a sűrűség csökkentésével a porozitás nő – azaz adott térfogatban kevesebb tömör fém található –, a megfelelő egyensúly megtalálása kulcsfontosságú. A kevésbé porózus, sűrűbb fémhabok általában nagyobb energia abszorpcióra képesek, mivel több szilárd anyagot tartalmaznak egységnyi térfogatban. A zömítés során ezeknél a haboknál több cellafal deformálódik, amely nagyobb mechanikai munkát igényel, ezáltal hatékonyabb energia abszorpciót eredményez. Xia és társai ugyan azt a kémia összetételű fémhabot vizsgálták 60, 65, 70 és 75%-os porozitás mellett [108]. A tanulmány rendkívül érdekes megfigyelésről számol be, miszerint a 60%-os porozitású fémhab 14 MJ/m³ energia abszorpciós értékkel rendelkezett ami 180%-al több, mint a 75%-os porozitású fémhabé. A 60%, 65%, 70% és 75% porozitású minták folyáshatárai rendre 20,55; 16,98; 13,45 és 2,26 MPa voltak, így kijelenthető, hogy az energiaelnyelő képesség a porozitás növekedésével nem lineárisan csökken. Fatame és társa 2021-es tanulmányokban hasonló következtetéseket fogalmaznak meg, ráadásul hasonló mértékű összefüggést fordított arányosságot detektáltak [109]. Xia kutatásaival ellentétben, ők a méréseikhez használt próbadarabok eltérő jellemzőit relatív sűrűségben és nem porozításban definiálták. A nagyobb

relatív sűrűségű próbadarabok jelentősen nagyobb platószilárdságot, valamint nagyobb energiaelnyelő képességet mutattak. Továbbá azt is kimutatták, hogy a pórusűrűség tervezésével elért energiaelnyelő képesség javulása különösen a kisebb relatív sűrűségű habok esetében érvényesül erőteljesebben.

A későbbiekben ismertetett méréseimhez használt fémhabokat a Beihai Composit, kínai székhelyű vállalatától vásároltam, amelynek weboldalán szintén elérhetők olyan táblázatok, amely igazolja a Xia és társai és Fatama és társa által publikált adatokat, miszerint egyértelmű összefüggés áll fenn a porozitás és az energia abszorpciós teljesítmény között. Az összefüggést viszont az adott hab előállítási módja, annak kémiai összetétele esetleges utólagos hőkezelése befolyásolja [110].

4.2 Fémhabok előállítása

A fémhabok előállítása többféle módon történhet, amelyek befolyásolhatják a végtermék mechanikai tulajdonságait. Alapvetően megkülönböztetünk fémolvadékot és fémport, mint kiindulási anyagot használó előállítási folyamatot, azonban fontos megemlíteni, hogy a második esetben is a szolidusz-likvidusz határon történik a habosítás. Egy további fontos különbség a porozitást létrehozó gáznak a forrása, hiszen a habosításhoz lehet külső forrásból származó gázt használni, habosítószer alkalmazni vagy az oldott gázt kicsapódásra kényszeríteni. A hab képződésének folyamata lejátszódhat azonnal, vagy késleltetett folyamat által [111].

A porkohászat a fémhabok gyártásának egyik gyakran alkalmazott módszere, amely magában foglalja a fémporok összekeverését nem fémes részecskékkel és habosítószerrel, majd a keveréket habosítható, úgynevezett prekuzorrá tömörítik. A prekuzort ezután felmelegítik, hogy a fém megolvadjon, és a habosítószer lebomlik, ekkor történik meg a gázbuborékok percipitációja, amelyek kitágítják a keveréket és teszik porózussá. Az elegyet ezután lehűtjük és megszilárdítjuk, így keletkezik a végső fémhab [111-112].

A porkohászati eljárás egyik módszere az öntőpépes habosítás. Ennél az eljárásnál finomított fémporból és habképző anyag keverékéből egy iszapos állagú anyagot készítenek, amit valamilyen szerves hordozóban homogenizálnak. Az így kapott keveréket felferik, majd a szilárd de porózus szerkezet eléréséhez kiégetik. Alumínium fémhabok esetében az öntőpépben alumíniumport diszpergálnak, majd habképző anyagnak sósavat, alumínium hidroxidot vagy foszforsavat alkalmaznak. A végtermék alakját természetesen az öntőforma határozza meg. A fémhab mechanikai tulajdonságai javíthatók hőkezeléssel [111-112].

A habosítással előállított fémhab esetében az olvadt fémhez fúvató anyagot, titán-hidroxidot adagolnak, amely a gázfejlődés során lebomlik. A keveréket hevítéssel a szolidusz-likvidusz hőmérsékletközbe hevítik, melynek során a felszabaduló gázok buborékokat hoznak létre, melyek áramlása és egymáshoz való csatlakozása alakítja ki a végső szerkezetet, melynek szilárd állapota a fémhab. A folyamat egyik legnagyobb hátránya - az egyszerűsége ellenére -, hogy nehezen szabályozható, és gyakran nem konzisztens cellaszerkezetet hoznak létre, ez a probléma azonban orvosolható keveréssel. Keveréssel ugyanis segíthető a buborékok egyenletes eloszlása az olvadékban, növelve ezzel a szerkezet homogenitását és csökkentve a belső óriás zárványok kialakulását. A végtermék porozitását és ezáltal a mechanikai tulajdonságait az olvadékban levő buborékok mérete és térbeli eloszlása határozza meg. A cél egy homogén eloszlású és ezáltal konzisztens porozitású termék létrehozása, hiszen ezzel az alakváltozási stabilitása és a energia abszorpciós képessége is javítható. Számos kutatás igazolja, hogy a fémhabok relatív sűrűsége, vagyis a szerkezeti porozitása egyértelmű és arányos összefüggést mutat az energia abszorpció tekintetében. A nagyobb fajlagos sűrűségű, vagyis kisebb porozitású fémhab szerkezetek nagyobb nyomóerő mellett érik az ugyan azt a zömölt állapotot a magasabb porozitású változatokhoz képest[107][112].

4.3 Fémhabok mechanikai vizsgálata

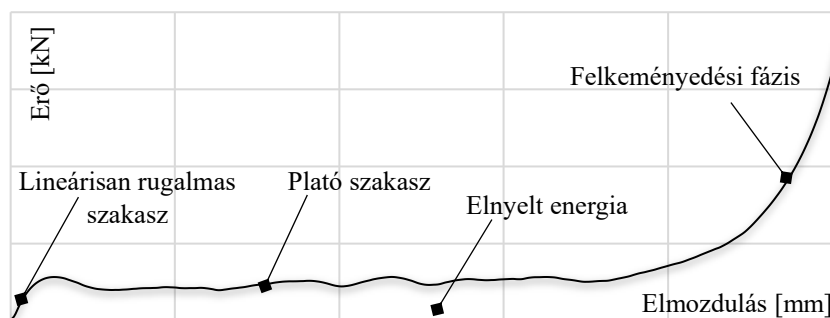
Fémhabok mechanikai tulajdonságainak elemzésére és energia abszorpciós képességének vizsgálatához a legcélravezetőbb vizsgálati módszer a zömítési vizsgálat. A kényszerek alapján viszont megkülönböztetünk egy vagy többtengelyű zömítéses vizsgálatot. Az egytengelyű vizsgálat esetén a próbadarabokat axiális irányban terheljük, oldalirányú kényszerek nélkül, lehetőséget adva ezáltal a Poisson-hatásnak, vagyis a hosszirányú deformáció okozta radiális irányú méretváltozásnak is.

Amennyiben a fémhabot egy csőbe helyezzük és annak zömítését a csövön belül végezzük azzal a radiális irányú deformációt gátoljuk, melynek eredményeképpen a Poisson-hatás nem tud érvényesülni. Ezt radiálisan gátolt zömítésnek, vagy többtengelyű terhelésnek nevezzük [KJ115], [KJ122].

A kutatás szempontjából a zártcellás alumínium fémhabok a releváns változatok, ezért a továbbiakban az erre vonatkozó információkat írom le.

A fémhabok zömítési erőre adott mechanikai reakciójuk az őket alkotó alapfémhez hasonlóan egy lineárisan rugalmas szakasszal kezdődik, amely egy folyási csúcserővel végződik melynek hatására képlékeny alakváltozás jön létre a cellaszerkezetben. A porózus szerkezetnek köszönhetően a plasztikus deformáció egy közel állandó, alacsony fluktuációs zömítő erő

mellett történik, amely az erő-elmozdulás diagramon egy közel vízszintes karakterisztikában nyilvánul meg. A teljes cellaszerkezet deformációját követően a karakterisztika egy meredeken emelkedő egyenessel végződik, amelyet a szakirodalom „densification” vagyis sűrűsödési vagy felkeményedési zóna néven definiál. A görbe alatti terület pedig az elnyelt energia mennyiségét fejezi ki Joule mértékegységben [KJ125], [KJ129]. Az 12. ábra egy tipikus, zártcellás fémhabokra jellemző gyűrődési karakterisztikát mutat.



12. ábra A fémhabokra jellemző gyűrődési karakterisztika főbb pontjai [KJ125][13-14]

Duarte és társai [13] zártcellás alumínium habok mechanikai tulajdonságait vizsgálták szabad és radiálisan gátolt zömítés mellett. A kutatás igazolta, hogy a radiálisan gátolt zömítés során a fémhab – porozitástól függően – átlagosan 35 %-al több energiát volt képes elnyelni. Megállapításra került általuk, hogy ezt az energia többletet a többtengelyű feszültségállapot valamint a fémhab és a cső közötti súrlódás okozza.

Li és társai [14] egy alumínium habot vizsgáltak szintén szabad és gátolt zömítésben. Az általuk publikált eredmények nagyban hasonlítottak Duarte és társai [13] eredményeire, hiszen a szabad és a gátolt változatok között számottevő különbség alakult ki. Míg a szabad zömítés esetén 4,8 MPa volt a nyomószilárdság értéke, addig a radiálisan gátolt változatnál már 17,4 MPa. A platófeszültség értékében 68%-os növekedésről számoltak be, számszerűen 22 MPa-ról 37 MPa-ra növekedett. A fent bemutatott eredmények alapján látható, hogy a gátolt zömítés során eltérően viselkedik a fémhab, mint a szabad zömítés során, azonban a kialakuló különbségek okait, és hogy milyen mértékben játszik szerepet a súrlódás a fémhab és a cső fala között nem kutatták.

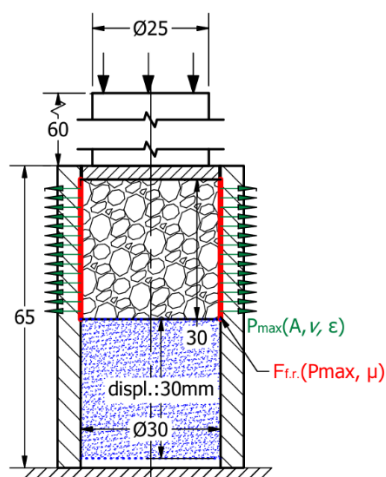
Számos tanulmányban olvashatunk zártcellás alumínium habok mechanikai vizsgálatáról szabad zömítés révén [113-115]. Ezek mindegyike arról számol be, hogy egyértelmű összefüggés van a fémhab porozitása és az energia abszorpciós képessége között, azonban nem találni információt arról, hogy hogyan alakulnak ezeknek a vizsgálatoknak az eredményei abban az esetben, ha egyidejűleg több, de eltérő sűrűségű próbatestet zömítünk. Fiedler és társai [116] állítottak elő olyan fémhab próbatestet, amely hosszanti tengelye mentén porozitásában

nem volt konzisztens, elérve ezáltal azt, hogy a próbatest felső és alsó fele eltérő relatív sűrűségű legyen. Sok más egyéb vizsgálat mellett zömítési tesztet is végeztek ezen a próbadarabon, ahol azt tapasztalták, hogy a felek porozitásnak megfelelően két plató szakasz alakul ki az erő-elmozdulási karakterisztikában. Ezen plató szakaszok viszonyát nem vizsgálták és a felső és alsó porozitásnak megfelelő próbadarab zömítési jellemzőivel való összehasonlítást sem végeztek.

5. Súrlódási ellenállás mérése radiálisan gátolt fémhab zömítés esetén

A lökhárító szerkezetek crashbox elemei plasztikus deformációjukkal csökkentik a járműben utazókra ható terhelés mértékét ütközési energia abszorpció révén. Ez az energia a abszorpciós képesség jelentősen növelhető fémhab integrációval, amikor is egy fémhabbal töltött vékonyfalú szerkezetet alkalmazunk. Léteznek olyan konstrukciók, amelyek esetében a fémhab töltet és a vékonyfalú szerkezet plasztikus deformációja nem egyidejűleg történik. Ez úgy tud megvalósulni, ha a töltetet először a vékonyfalú szerkezeten belül zömítjük, valamilyen mechanizmussal, és majd ezt követi a crashbox váz maradó deformációja. Ez a folyamat egy tipikus alkalmazási példája a többtengelyű fémhab zömítésnek. A szakirodalmakban fellelt adatok és az általam végzett mérések azt igazolják, hogy a radiálisan gátolt konstrukcióban, ugyanazon sűrűségű és típusú hab azonos mértékű deformációjához 25-30%-al nagyobb energia befektetés szükséges a hagyományos szabad zömítéshez viszonyítva. Ezt azt jelenti, hogy a hab energia elnyelő képessége - azonos sűrűséget alapul véve- hatékonyabban kihasználható, mintha az egy önálló karosszéria elemet képezne.

Radiálisan gátolt zömítés esetén jelentkező energia többlet alapvetően két okra vezethető vissza. Az egyik ok, hogy a radiális irányú kényszer csökkenti a porózus szerkezet szabadságfokainak számát, növelve ezzel annak szerkezeti merevségét, vagyis a fémhab nagyobb ellenállást képest tanúsítani a külső terhelés okozta alakváltozással szemben. A másik oka az energia többletnek a zömítés során, a fémhab és a csőfala között ébredő súrlódási ellenállás, amely gátolja a terhelés okozta axiális irányú deformációt [KJ118] [KJ125]. Ráadásul ez ellenállás függ az érintkezési felületek méretétől, a radiális irányú erőtől és a hab és a csőfala között mutatkozó súrlódási tényezőtől, melyek mindegyike folyamatosan változik a zömítés során. A folyamatos axiális deformáció a radiális irányú normálerő növekedését okozza, amely magával vonja a súrlódási ellenállás növekedést is. Ezt az összefüggést mutatja be a következő (13. ábra), ahol zölddel került jelölésre a normál erő, pirossal a pedig a súrlódási ellenállás.



13. ábra Normálóerő értelmezése radiálisan gátolt zömítés esetén [KJ118]

A radiálisan gátolt zömítések szakirodalma azonban nem számol be arról, hogy a zömítés esetén jelentkező többlet energia hány százaléka fordítódik a hab és a csőfala között ébredő súrlódás leküzdésére. Ebben a fejezetben ennek a súrlódási ellenállás mérésének menete, eredményei és következtetései kerülnek bemutatásra.

5.1 Próbadarabok bemutatása

A súrlódási ellenállás mérését kétféle sűrűségű zártcellás alumínium habra vonatkozóan végeztem el, számszerűen egy 0,4 és egy 0,7 g/cm³ sűrűségű habot alkalmaztam. A próbatestekhez szükséges fémhabokat a kínai Behai Composite Materials Co.-tól szereztem be, 600 x 600 x 30 mm tömbösített formában. Anyagösszetétele ismert: 97% alumínium por, 3% habosító (1%TiH₂, 2% Ca), nemesítés nélküli, nem környezet terhelő.

A táblásított fémhabból vízszintes vágással kerültek kimunkálásra a 30 mm átmérőjű és 30 mm magas próbatestek. A precíz vágási folyamatnak köszönhetően a minták magassága és átmérője egyenletes volt, amit digitális tolómérővel ellenőriztem a próbatest több pontján. Annak érdekében, hogy a vizsgálati eredményeket ne befolyásolják a mintadarabok esetleges belső anyag- vagy szerkezeti eltérései, a méréseket háromszor ismételttem, hogy növeljem a mérési eredmények statisztika átlagát, ennek megfelelően a mérési eredmények minden esetben az számított átlagokon kerülnek bemutatásra. A radiálisan gátolt vizsgálat során a fémhab próbatesteket 30 mm belső névleges átmérőjű, 5 mm falvastagságú és 65 mm magas alumíniumcsőbe helyeztem, és egy 28 mm átmérőjű és 3 mm vastagságú, szintén alumíniumból készült nyomólapon keresztül terheltem a nyomórúd által. A cső előkészítése nem igényelt semmiféle felületi megmunkálást vagy utólagos alakítást a 65 mm-es magasságú darabokra való vágáson felül. A cső és a nyomólemez anyagát tekintve az AlMgSi AW EN6061-et alkalmaztam, mint az autóiipari szerkezetek, főként a lökhárítórendszer és tartozékai területén

gyakran használt anyagot. A vizsgálógép keresztfeje és a nyomólemez közé egy 28 mm névleges átmérőjű cső formájában egy úgynevezett nyomórudat alkalmaztam. A vizsgálat előtt előkészített próbatesteket az 14. ábra mutatja be, míg geometriai adataikat az 3. táblázat tartalmazza. A méretek és a tömegek ellenőrzése alapján a gyártó által ígért elméleti sűrűségeket ellenőriztem és igazoltam. Ehhez hitelesített digitális tolómérőt és precíziós mérleget használtam. A tolómérő segítségével megmértem a próbadarabok magasságát és több ponton az átmérőjét, így ki tudtam számítani a térfogatát. A digitális precíziós mérleg segítségével pedig század pontossággal meghatároztam a próbadarabok tömegét. A tömeg és a térfogati értékeket hányadosával megkaptam a valós sűrűség értékét. Ez az ellenőrző mérés adta a 3. táblázat adatait.



14. ábra A sűrűlási ellenállás meghatározásához használt próbadarabok [KJ118]

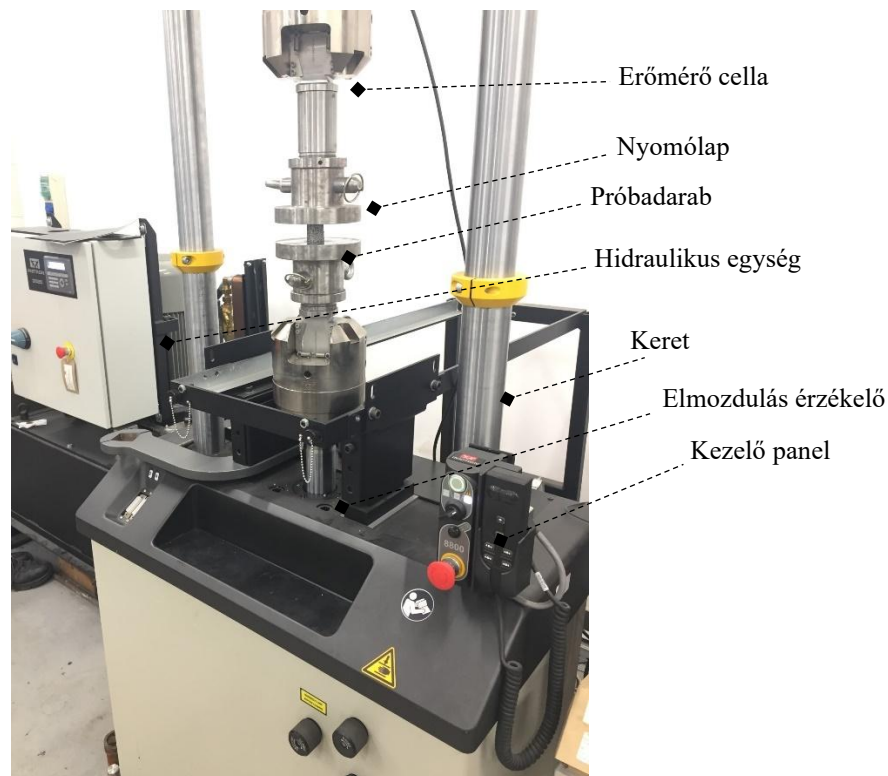
3. táblázat A próbadarabok geometriai adatai [KJ118]

Jelölés	Kisebb sűrűségű hab			Nagyobb sűrűségű hab		
	Tömeg [g]	Térfogat [cm ³]	Sűrűség [g/cm ³]	Tömeg [g]	Térfogat [cm ³]	Sűrűség [g/cm ³]
SP1	9,24	21,21	0,43	14,25	21,19	0,67
SP2	9,20	21,17	0,43	14,05	21,19	0,66
SP3	9,31	21,09	0,44	14,31	21,32	0,67
Átlag	9,25	21,15	0,43	14,20	21,26	0,67

5.2 Mérési paraméterek, kondíciók

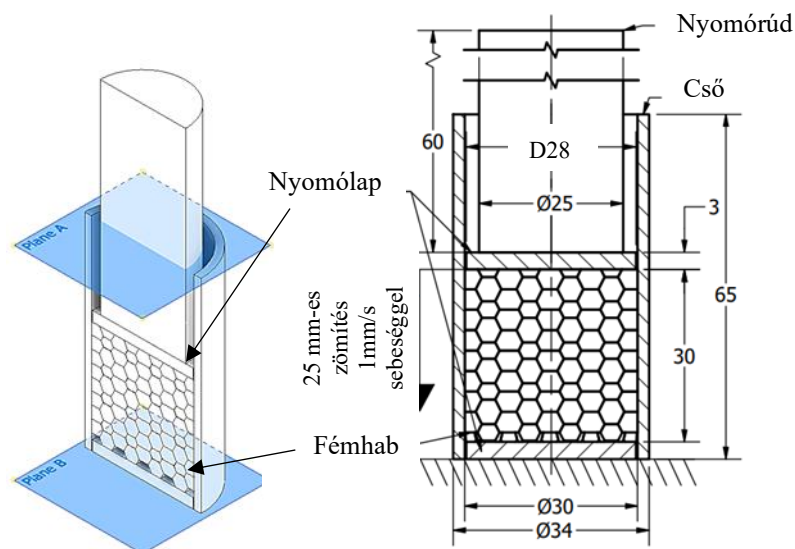
A vizsgálathoz INSTRON 8801 szervohidraulikus anyagvizsgáló gépet használtam, amely adatgyűjtő és elemző szoftverrel, nevezetesen WaveMatrix-al volt integrálva az erő- és elmozdulás értékek rögzítése érdekében. A vizsgálógép keresztfejének sebessége 1 mm/s volt, míg a rendszer adatrögzítési frekvenciája 100 Hz volt. A keresztfej elmozdulást a mérőrendszerbe integrált elmozdulás dekódoló rögzítette, az erőt pedig 100 kN terhelési határértékkel rendelkező erőmérő cella érzékelte. A mérést a Debreceni Egyetem Műszaki Karának akkreditált laboratóriumában végeztem. A mérőműszer a mérés alkalmával érvényes kalibrációs és hitelesítési naplóval rendelkezett. A terhelés leválasztása többféle módon

történhet, elmozdulás, idő, vagy terhelési érték meghaladásakor. A fémhabokra jellemző hirtelen felkeményedési szakasz miatt, egy 80 kN-os terhelési határértéket állítottam be, hogy biztosan ne érhesse túlterhelés az erőmérő cellát. A következő (15. ábra) a mérőberendezést és annak felépítését mutatja.



15. ábra A zömítési vizsgálatokhoz használt Instron 8801 fárasztógép [KJ118]

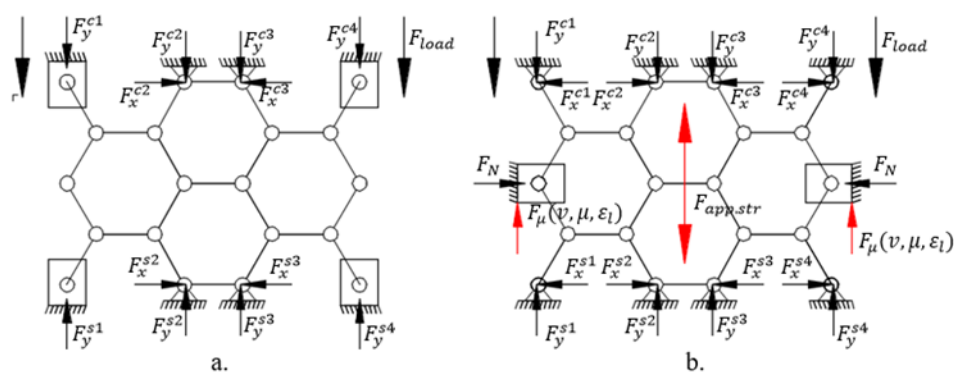
A mérési folyamat szabad (egy tengelyű) zömítéssel kezdődött, hogy információt kapjak arról, hogy a habok egyenként milyen energia abszorpcióra képesek. Ezt követően a mérést megismételtem immáron radiálisan gátolt változatban, vagyis a zártcellás fémhabokból készült próbadarabokat a fent bemutatott alumínium csőbe helyeztem, és azon belül történt a zömítési folyamat. Mind a szabad mind pedig a radiálisan gátolt változatban az eredetileg 30 mm magas próbatesten 25 mm-es zömítést alkalmaztam, vagyis a névleges alakváltozás több mint 80%-os volt. Mindkét esetben rögzítettem az erő-elmozdulás függvényeket, hogy a mérés során kapott görbék alatti területetek méretét, vagyis a befektetett/elnyelt energiát az integrált segítségével meg tudjam határozni. A szabad zömítést és a radiálisan gátolt zömítést is mindkét habra (0,4 és 0,7 g/cm³) vonatkozóan elvégeztem. A radiálisan gátolt változat koncepcióját mutatja be a 16. ábra.



16. ábra A radiálisan gátolt zömítés koncepciója [KJ118]

Ahogy a méréshez szükséges próbadarabok bemutatásánál említettem, az alumínium hab névleges külső átmérője és a cső belső névleges átmérője megegyezett. Az hab csőbe való behelyezése nem igényelt összeszerelő szerszámot, vagy préselő erőt, kézi összeillesztéssel kivitelezhető volt. Az axiális irányú erőt, egy nyomórúdon és ahhoz kapcsolódó nyomólapon keresztül fejtettem ki a próbatestre. Ahhoz, hogy elkerüljem a nyomólap valamint a nyomórúd és a cső fala közötti súrlódást, mindkettőt kisebb átmérőjűre választottam meg. Nevezetesen 28 mm-es átmérőjű nyomólapot és 25 mm-es átmérőjű nyomórúdat alkalmaztam. Sem az összeszereléshez, sem a zömítési folyamathoz nem alkalmaztam kenőanyagot.

A vizsgálat során a fémhabot axiális nyomóerővel terheltem az alumínium csövön belül. Figyelembe véve az anyagokra jellemző Poisson-hatást, a nyomó- vagy húzóterhelés radiális alakváltozással jár. Ebben az esetben viszont a kompresszió okozta radiális irányú méretnövekedést a cső fala gátolja. Ha a zártcellás fémhab szerkezetet kétdimenziós csuklós szerkezetnek tekintjük, annak oldalsó csomópontjaihoz tartozó, az 17. ábra szerinti x-irányú szabadságfoka blokkolva van növelve ezzel a konstrukció merevségét és szilárdságát. Ezt látszólagos merevség néven definiáltam, hiszen ezt csak a radiális támasz okozza és nem a fémhab tömb önálló jellemzője. A csuklós szerkezetként definiált zártcellás fémhabok cellafalai megfeleltethetők a szerkezet rúdjainak, amelyek csomópontokon keresztül kapcsolódnak. Az egyszerűsített csuklós szerkezetet a 17. ábra mutatja, ahol az F_y a csomópont nyomó terhelése, F_y^s a támasztó vagy reakcióerő, F_N a radiális normálerő, míg az F_μ a súrlódást jelenti.

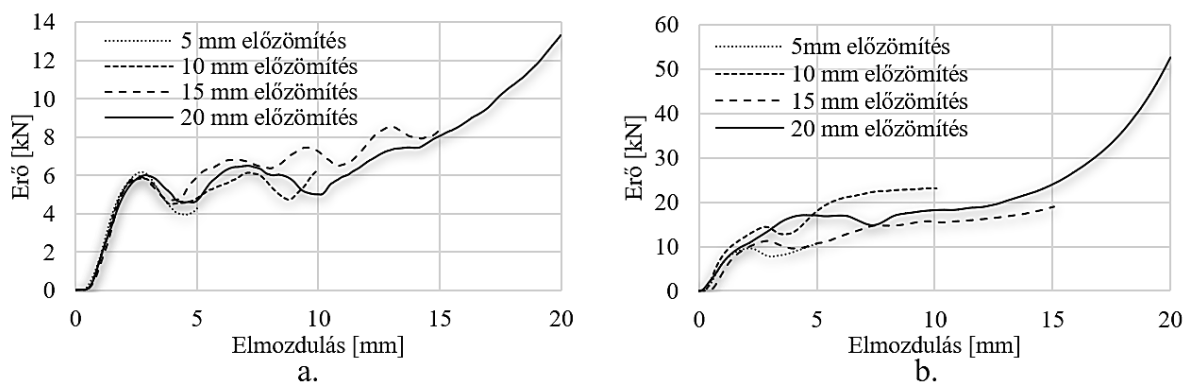


17. ábra A cellaszerkezetek csuklós szerkezetként való ábrázolása (a. szabad zömítés; b. radiálisan gátolt zömítés) [KJ118]

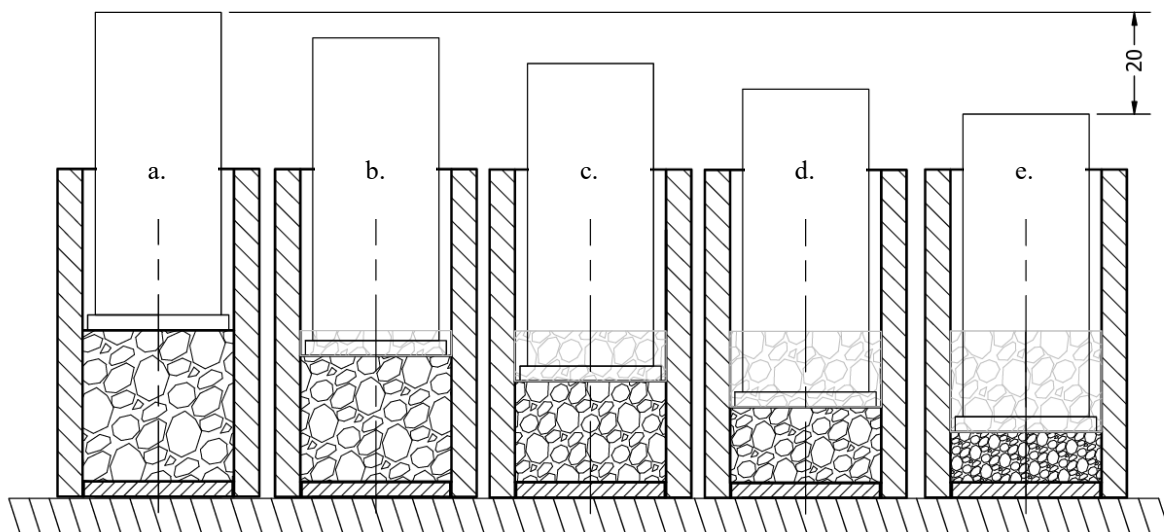
A radiálisan gátolt zömítés alkalmával a sugárirányú normálerő megjelenése miatt kialakul a súrlódó erő a hab és a cső fala között. Figyelembe véve a Poisson-effektust, valamint a fémhab és a cső közötti kontakt felületet mértékét, a súrlódási ellenállás feltételei folyamatosan változnak, befolyásolva ezzel a leküzdéséhez szükséges terhelést. A mérés célja pedig pontosan az, hogy meghatározzuk a radiális zömítésnél jelentkező súrlódás leküzdéséhez szükséges energia mértékét.

5.3 A súrlódás méréshez szükséges próbadarabok és a mérés menete

A súrlódás méréshez öt darab fémhabra volt szükség, melyet egyenként a radiálisan gátolt zömítéshez hasonlóan külön-külön alumínium csőbe helyeztem. Ezt követően több fajta előzömítést alkalmaztam a fémhabokra vonatkozóan. Az első összeszerelt változatot zömítetlen állapotban hagytam többi próbatestet pedig sorrendben 5, 10, 15 és 20 mm-rel zömítettem természetesen a csövön belül a fent már említett nyomórúd és nyomólap segítségével, hogy egy előzömített állapotot érjek el. A 18.a ábra a $0,4 \text{ g/cm}^3$ a 18.b ábra pedig a $0,7 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű hab csövön belüli előzömítése során rögzített diagramjait szemlélteti. Az előzömítési folyamat szegmenseit sematikusan a 19. ábrán mutatom be.



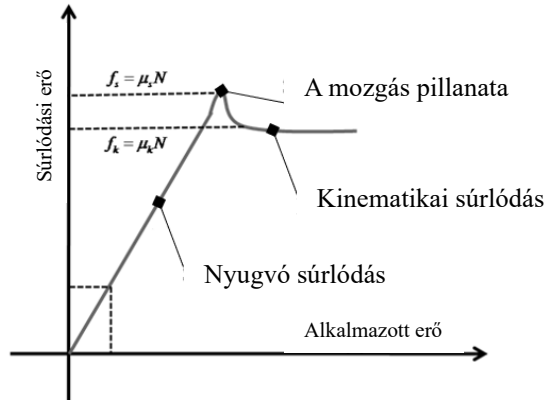
18. ábra Az előzömítések során rögzített diagramok (a. $0,4 \text{ g/cm}^3$; b. $0,7 \text{ g/cm}^3$)



19. ábra A súrlódásméréshez használt fémhabok előzőmítése a csövön belül

(a. 0 mm; b. 5 mm; c. 10 mm; d. 15 mm; e. 20 mm)

A következő lépésben az előző fejezetben bemutatott előzőmített habok csövön belüli mozgatásához szükséges energia, vagyis a súrlódási ellenállás meghatározása történt. A csöveket benne az előzőmített habokkal együtt, egyenként a vizsgáló gépbe helyeztem, majd az előzőmítéshez is használt nyomólap és nyomórúdon segítségével 30 mm elmozdulást idéztem elő. Elsőként az előzőmítés nélküli habbal szerelt konstrukción végeztem a mérést. Mivel sem a nyomólap sem pedig a nyomórúd nincs érintkezésben a cső falával, ezért a hab, csövön belüli mozgatáshoz szükséges erő kizárólag a közöttük ébredő súrlódási ellenállástól függ. Ezt a csövön belüli mozgatást az 5, 10, 15 és 20 mm-rel előzőmített változatú habokon is elvégeztem. A mérés elején azzal a hipotézissel éltem, hogy a tribológia tudományában is ismert statikus és kinematikus súrlódási karakterisztikát kell kapnom a habok egyenként való mozgatása alkalmával. Ezt azt jelenti, hogy a kezdeti magas nyugalmi, vagy statikus súrlódási értéket egy platószerű kinematikus súrlódási ellenállás váltja fel. Ezek elméleti kapcsolatát a 20. ábrán mutatom be.

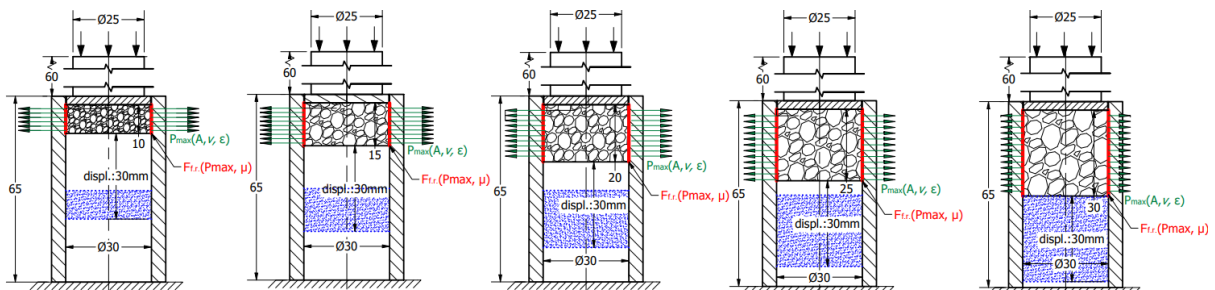


20. ábra Statikus és kinematikus súrlódás kapcsolata [KJ118]

A Coulomb-féle száraz súrlódást (27) alapvetően a érintkező felületek közötti normálerő (F_N) és a súrlódási együttható (μ) határozza meg.

$$F_{\text{súrl.}} = \mu \cdot F_N \quad (27)$$

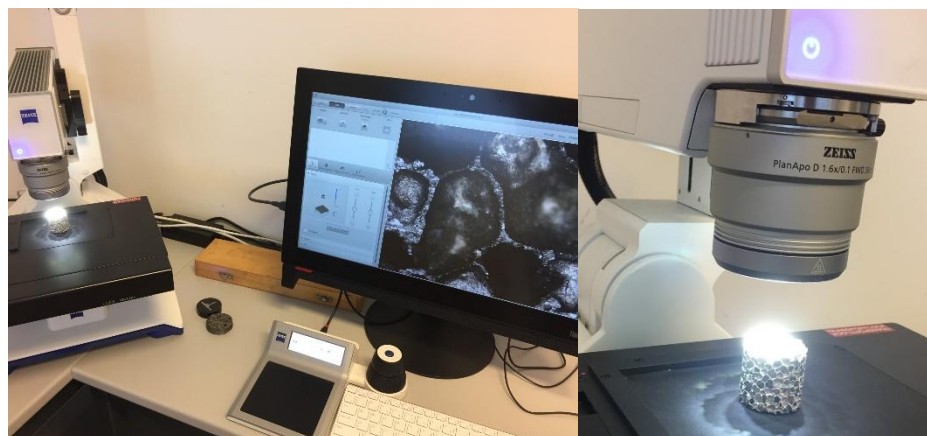
Jelen esetben az F_N a fémhab Poisson-tényezőjétől (ν) függ, hiszen a axiális irányú zömítés egy radiális irányú normálerő növekedésben nyilvánul meg. Ezen a normálirányú erő növekedéséről Dr. Szlancsik Attila is beszámol - doktori értekezésében [12] - amelyet a cső külső falára helyett nyúlásmérő bélyegek segítségével detektált radiálisan gátolt zömítések esetén. A 21. ábra sorozat az előzömített habok csövön belüli mozgását mutatja be. Zöld színnel jelöltem a radiális irányú normálerő alakulását (P_{max}), amely szerint jól megfigyelhető, hogy a növekvő axális deformáció magával vonja a radiális erő növekedését. Ennek értékét a Poisson-tényező, az axiális terhelés mértéke és a kontaktfelületek minősége határozza meg.) Piros színnel jelöltem az a működő kontakt felületet, amelynek kapcsolata okozza a súrlódási ellenállást ($F_{f.r.}$). A kék színnel sraffozot terület az előzömített habok, csövön belüli mozgása utáni véghelyzetét mutatja, amely alapján megfigyelhető, hogy mindegyik változat esetében 30 mm elmozdulást alkalmaztam. Mindegyik típus esetében a mérés azonos kondíciók mellett történt, és az erő elmozdulási értékek kerültek rögzítésre.



21. ábra A normál erők és a kontakt felületek alakulása, valamint a előzömített habok mozgása utáni véghelyzet [KJ118]

5.4 Mikroszkópos felületvizsgálat

Fontosnak tartottam az egyes habokra vonatkozó kezdeti kontaktfelületek méretének meghatározását, ez azonban porózus anyagok esetében nehéz feladat. Ezért a sűrűség méréshez használt fémhabokat mikroszkópos felületvizsgálatnak vettem alá. A vizsgálathoz Zeiss Smartzoom 5 típusú digitális mikroszkópot használtam integrált Zeiss Zen képelemző szoftverrel. A felületvizsgálathoz használt eszközökről, a vizsgálat során készített fényképek az 22. ábrán láthatók.

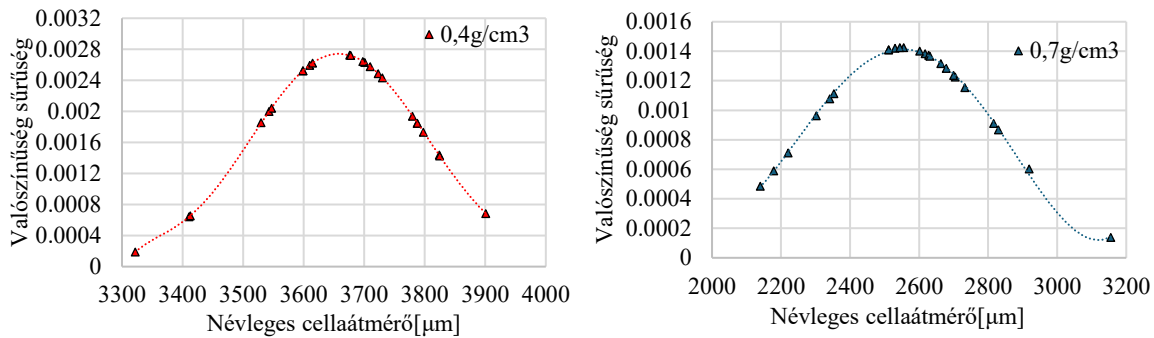


22. ábra Fémhab próbatestek felületvizsgálata mikroszkóppal [KJ118]

Első lépésben a fémhab próbatest több szegmensében - a beépített grafikus mérőmodulok segítségével - meghatároztam a cella átmérőket. Az így kapott értékekből megszerkeszthető a Gauss diagram, amelyből következtetést tudunk tenni a habra jellemző átlagos cellaméretre. Ezeket a diagramokat mutatja be a 24. ábra. A $0,4 \text{ g/cm}^3$ típusú hab esetén az átlagos cellaméret $3680 \mu\text{m}$ volt, míg a $0,7 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű hab esetében $2570 \mu\text{m}$. A vizsgálat során készült felvételek a 23. ábrán láthatók.

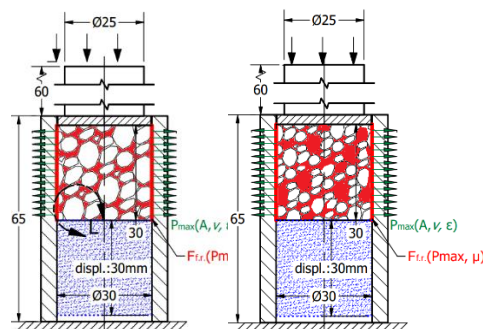


23. ábra A zömítési vizsgálatok előtt készített mikroszkópos felvételek [KJ118]



24. ábra A jellemző cellaátmérők eloszlása [KJ118]

A hab és a csőfal érintkezési felületének nagyságrendi meghatározásához és a két hab összehasonlításához először egy 100 mm^2 egységnyi területet vettem alapul, amelyen belül a cellák száma digitális mikroszkóp segítségével könnyen megszámolható, majd ez a hengeres próbatest teljes felületére kiterjeszthető. A vizsgálat szerint a $0,7 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű hab 100 mm^2 terület egységére 14,6 db; míg a $0,4 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű hab esetén 8,3 db cella jut. Ezt a számítást a hengeres próbatest teljes burkolatára alkalmazva megkaphatjuk az érintkezési felületet a felületen lévő zárványok közötti falvastagságok összegeként. 30 mm átmérőjű és magasságú hengeres tömör próbatest felülete $9,42 \text{ cm}^2$. Az cellák számát, méretét és eltérését figyelembe véve a hab külső érintkezési felülete sűrűbb hab esetén $2,42 \text{ cm}^2$, $0,4 \text{ g/cm}^3$ típusú hab esetén pedig $1,13 \text{ cm}^2$. Ezek az érték a zömítetlen, eredeti állapotú habokra érvényesek. A hab axiális terhelése egyre több cella deformációt eredményez, ami az érintkezési felület folyamatos változását eredményezheti. Ezeknek az érintkezési felületnek az értelmezését mutatja a 25. ábra, ahol pirossal jelöltem a kontakt felületet mindkét sűrűségű habra vonatkozóan.

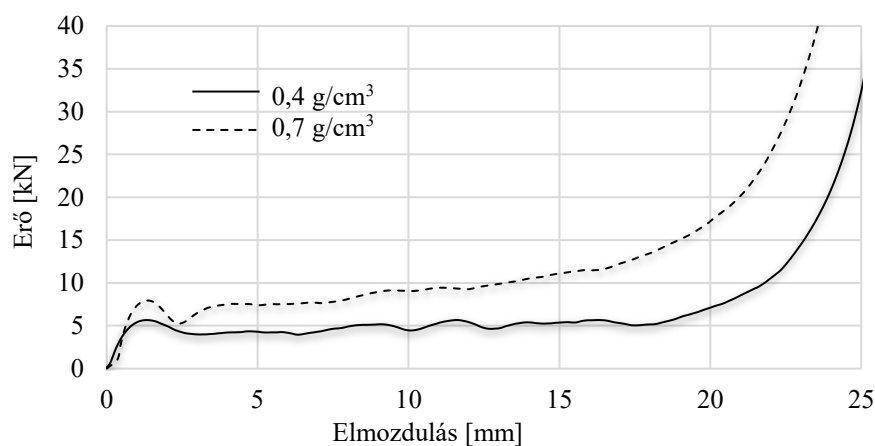


25. ábra A fémhab és a cső belső palástja közötti kontakt felület pirossal jelölve [KJ118]

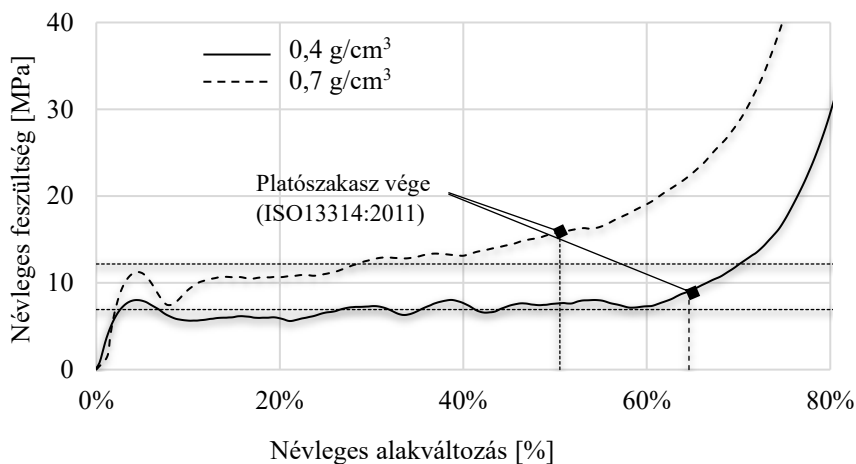
5.5 Szabad és radiálisan gátolt zömítés eredményei

Első lépésként a habokat 1 mm/s sebességgel terheltem szabad zömítési változatban, sugárirányú kényszer nélkül. A mérés során kapott grafikonok a tipikus erő-elmozdulás diagramot követte, vagyis jól megfigyelhető a lineárisan rugalmas, a plató és a felkeményedési zóna [KJ125]. A fémhabok porozításának hatása a grafikus első lokális maximumában

látványosan megmutatkozik, hiszen az alacsonyabb sűrűségű hab esetében 5,66 kN, míg a nagyobb sűrűségű változat esetében 7,94 kN terhelő erőre volt szükség a plasztikus deformáció megjelenéséhez. A kiértékeléshez az idevonatkozó ISO 13314 (2011) szabvány leírását vettem alapul, amely szerint a platófeszültség a 20 % és 30 % vagy 20 % és 40 % közötti, 0,1 %-os vagy annál kisebb alakváltozási intervallumokban fellépő feszültségek számtani átlaga [117]. A platófeszültség átlagértéke 15 %-kal kisebb volt a kisebb sűrűségű fémhabnál a nagyobb sűrűségű változathoz viszonyítva. Számszerűen a plató zónában az átlagos feszültség 6,92 MPa volt a 0,4 g/cm³ habnál és 12,26 MPa a sűrűbb hab esetében. A fent említett ISO-szabvány a plató zóna végét a feszültség-alakváltozás görbe azon pontjaként határozza meg, ahol a feszültség meghaladja a plató feszültség 1,3-szorosát. Ezek alapján meghatározható a plató zóna végéhez tartozó névleges alakváltozás értéke, számszerűen 64,28 % és 50,53 % a kisebbik és a nagyobb sűrűségű hab esetében. A vizsgálatok során kapott eredményeket az 26. és 27. ábra mutatja be.

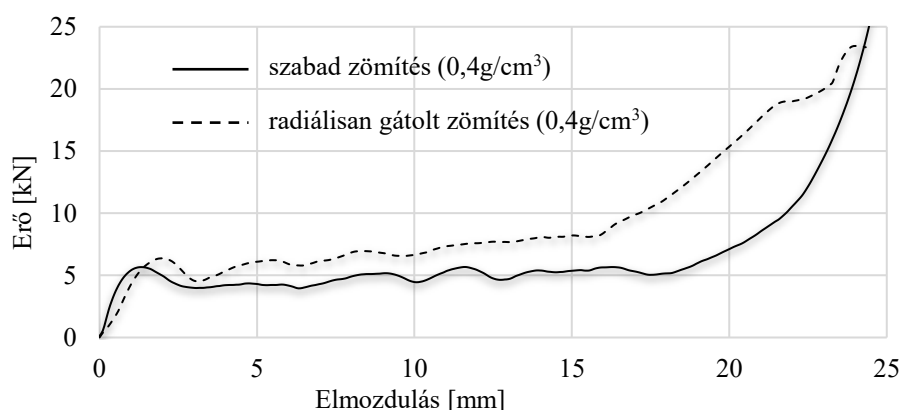


26. ábra A szabadzömítés erő-elmozdulás diagramja [KJ118]

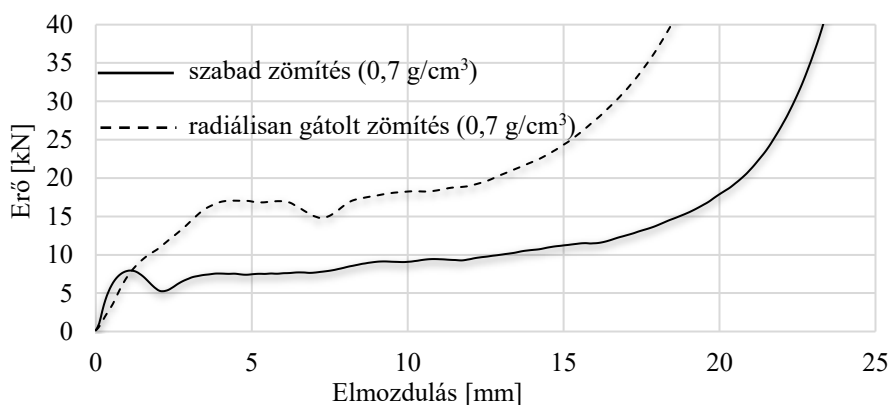


27. ábra A platószakasz alakulása a zömítés során [KJ118]

A radiálisan gátolt zömítési vizsgálatom igazolta azt a kezdeti hipotézisemet és a más tanulmányokban olvasható állításokat, mely szerint nagyobb energia befektetésre van szükség ugyan azon típusú hab, ugyan olyan mértékű deformációjának eléréséhez, mint szabad zömítés esetén. A tipikus szakaszok, mint a lineáris rugalmas zóna, a plató és a felkeményedés ebben a vizsgálati helyzetben is megfigyelhetők. A plató zóna azonban rövidebb és kissé meredekebb karakterisztikát mutat, mint az egytengelyes terheléses változatban. A nyomóterhelés során az erő-elmozdulás grafikonok nagyobb értékeket vettek fel, ami a fent említett, a cső fala okozta megnövekedett alakváltozással szembeni ellenállással és a súrlódási ellenállással magyarázható. Számszerűen a plató zóna ebben az esetben 24,48 MPa értékkel jellemezhető a sűrűbb fémhabnál, míg a $0,4 \text{ g/cm}^3$ típusú hab esetében ez az érték 9,51 MPa volt. A másik jelentős eltérés a szabad és a radiálisan gátolt zömítési konstrukciók között az, hogy a cellaszerkezet felkeményedése hamarabb bekövetkezik. A 28. ábra és a 29. ábra a radiálisan gátolt zömítés eredményét mutatja a szabad zömítéshez viszonyítva.



28. ábra A $0,4 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű fémhab szabad és radiálisan gátolt zömítési karakterisztikája [KJ118]



29. ábra A $0,7 \text{ g/cm}^3$ típusú fémhab szabad és radiálisan gátolt zömítési karakterisztikája [KJ118]

5.6 Energia abszorpció és hatékonyság

Az energiaszinteket figyelembe véve a $0,4 \text{ g/cm}^3$ típusú hab a sugárirányban korlátozott változatban 32,5 %-kal több energiát volt képes elnyelni a zömítés során, mint az egytengelyű terhelés koncepciójában. A $0,7 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű hab pedig extrém, 90,5 %-kal több energiát igényelt a radiálisan gátolt vizsgálat során. A plató vége a félkeményedési zóna kezdetét jelenti, amely a $0,4 \text{ g/cm}^3$ hab esetében 64,28 %-os alakváltozásnál következett be szabad zömítés esetén és 53,86 %-os alakváltozásnál a radiálisan gátolt változatban. A plató szakasz vége a nagyobb sűrűségű habnál 50,53 %-os névleges alakváltozásnál következett be, míg a csövön belüli zömítés esetén ez az érték 47,19 % volt. A porózus szerkezetű abszorberekre jellemző a plató szakasznak az energia abszorpció tekintetében kiemelt jelentősége van, ezért az elnyelt energia mértékét és az abszorber hatékonyságát a plató zónára vonatkoztatva számítottam ki, amelyeket a 4. táblázatban foglaltam össze. Az egységnyi tömegre vonatkoztatott elnyelt energia - SEA (Specific Energy Absorbing) értékeknél fontos megemlíteni, hogy ezen értékek kizárólag a fémhabra vonatkoztatott adatok, nem vettem figyelembe a cső, a nyomólap és a nyomórúd tömegét és térfogatát hiszen azok eszközei a mérésnek és nem abszorberei.

4. táblázat A platószakaszra vonatkoztatott abszorpciós és hatékonysági értékek [KJ118]

Eredmények	Szabadzömítés ($0,4 \text{ g/cm}^3$)	Radiálisan gátolt zömítés ($0,4 \text{ g/cm}^3$)	Szabadzömítés ($0,7 \text{ g/cm}^3$)	Radiálisan gátolt zömítés ($0,7 \text{ g/cm}^3$)
Plató feszültség [MPa]	6,92	9,51	12,26	24,48
Félkeményedési alakváltozás [%]	64,28	53,86	50,53	47,19
Félkeményedési alakváltozáshoz tartozó elmozdulás [mm]	19,28	16,15	15,16	14,16
EA [J]	93,96	104,33	126,13	225,31
SEA [J/g]	10,15	nem releváns	8,88	nem releváns
CFE [%]	77,91	106,13	108,43	112,54
ULC [%]	0,15	3,8	1,11	29,61

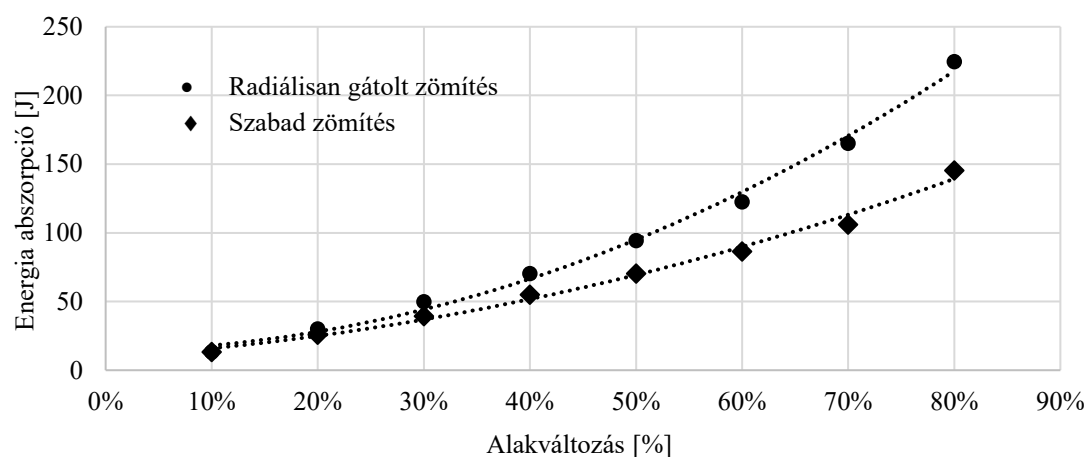
Amint az fentebb említésre került, a terhelés 80 kN-nál volt korlátozva az erőmérő cella túlterhelésének megakadályozása miatt, ezért a $0,7 \text{ g/cm}^3$ hab radiális kényszerített nyomóvizsgálata csak 66,29 %-os alakváltozásig volt kivitelezhető, ami 20 mm-es axiális elmozdulásnak felel meg. Az energia abszorpciós értékeket 5 mm-es elmozdulási tartományonként is kifejeztem, amelyet a 5. és a 6. táblázat tartalmazza, valamint a 30. és a 31. ábra mutatja be.

5. táblázat A 0,4 g/cm³ típusú hab által elnyelt energia szabad és radiálisan gátolt zömítés alkalmazásával [KJ118]

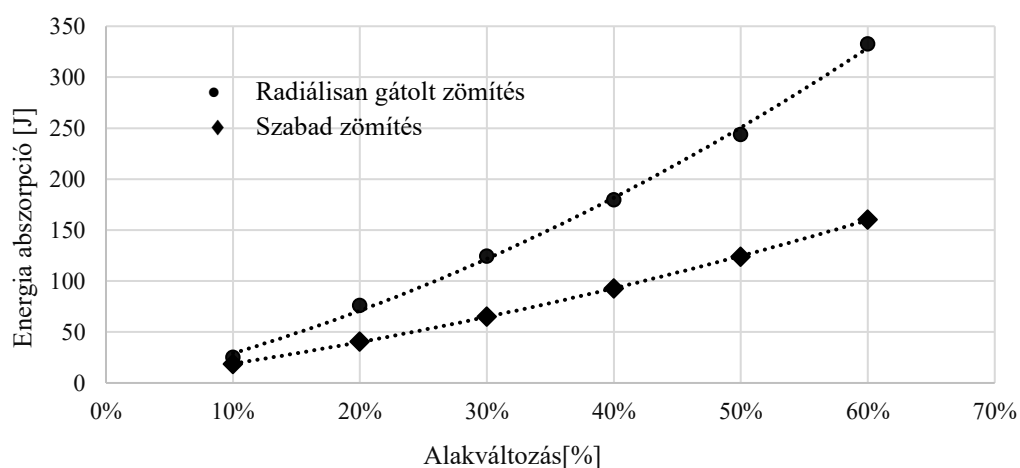
Zömítési löket [mm]	Szabad zömítés	Radiálisan gátolt zömítés	Különbség	
0-5	20,87 J	23,86 J	2,99 J	+11,4%
0-10	43,48 J	53,37 J	9,89 J	+22,7%
0-15	68,88 J	94,42 J	25,54 J	+37,1%
0-20	97,51 J	149,79 J	52,28 J	+53,6%

6. táblázat A 0,7 g/cm³ típusú hab által elnyelt energia szabad és radiálisan gátolt zömítés alkalmazásával [KJ118]

Zömítési löket [mm]	Szabad zömítés	Radiálisan gátolt zömítés	Különbség	
0-5	31,53 J	59,84 J	28,31 J	+89,7%
0-10	72,21 J	142,93 J	70,72 J	+97,93%
0-15	121,54 J	244,03 J	122,49 J	+100,1%
0-20	190,03 J	415,18 J	225,03 J	+118,48%



30. ábra 0,4 g/cm³ típusú hab abszorpciós karakterisztikája [KJ118]



31. ábra 0,7 g/cm³ típusú hab abszorpciós karakterisztikája [KJ118]

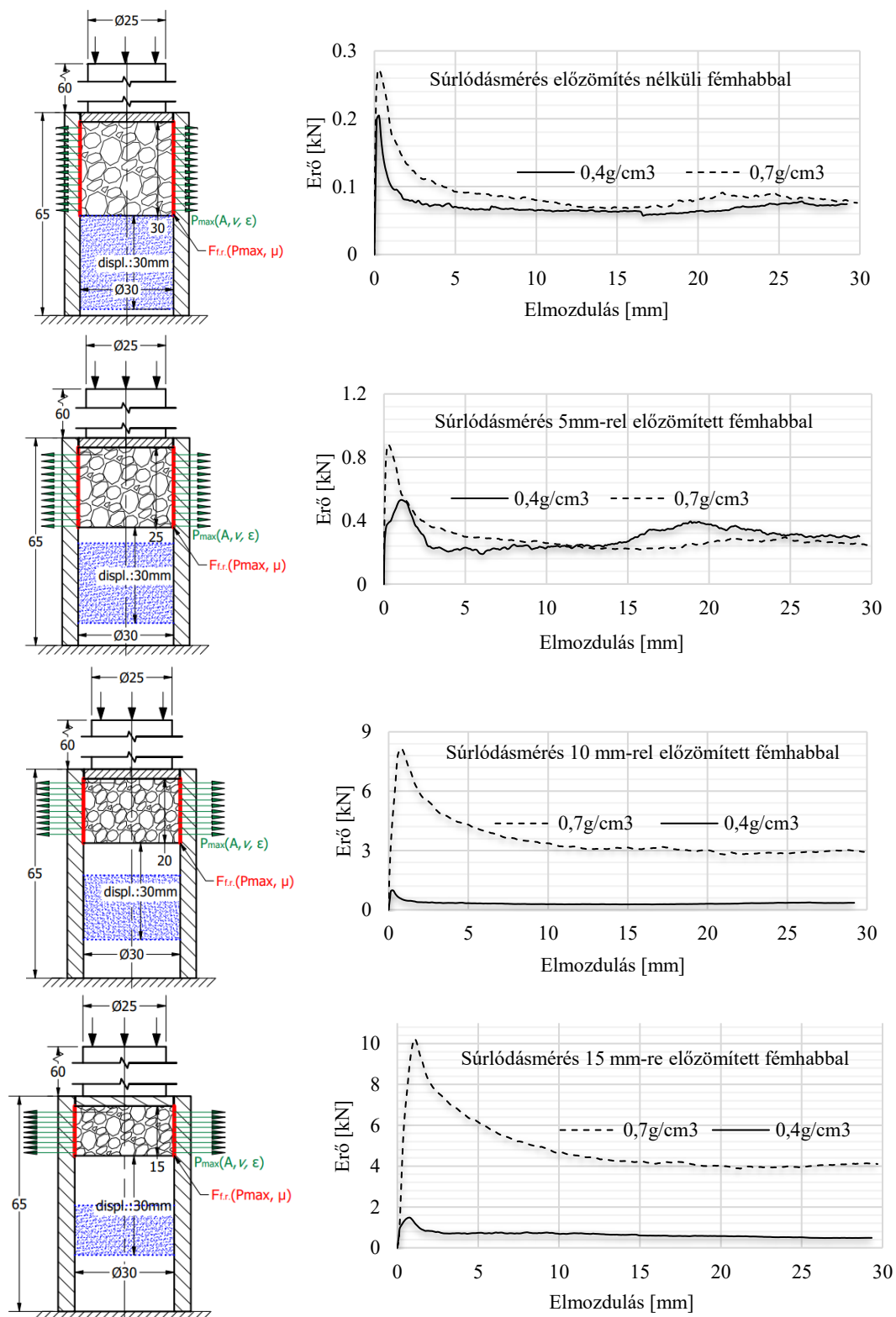
5.7 Súrlódási ellenállás meghatározása

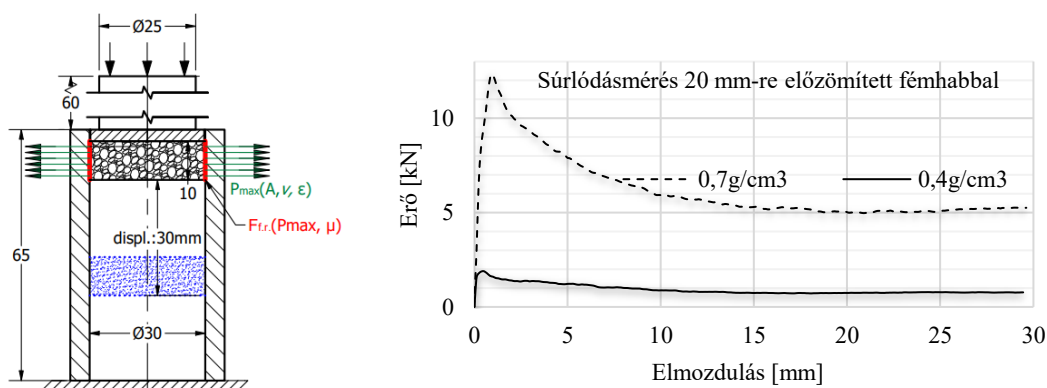
Amint az előzőekben bemutatott mérés igazolta, a fémhab zömítés radiálisan gátolt változata nagyobb nyomóenergia-szükségletet jelentenek a gátolt celladeformáció valamint a hab és a cső fala közötti súrlódás leküzdése miatt. Jelen mérés fő célja a súrlódási arány feltárása a radiális kényszerterhelés során. A súrlódásmérés lépéseit az 5.3 fejezetben mutattam be.

A vizsgálat eredményei igazolta azt a feltételezésemet, amely szerint a radiálisan gátolt zömítéshez szükséges energia többlet egy jelentős része a súrlódási ellenállás okozza. A továbbiakban ismertetett értékek és grafikonok a párhuzamos mérésekből számított átlagot jelölik. A grafikonokat elemezve a tipikus kinematikai és statikus súrlódásra jellemző karakterisztikákat figyelhetjük meg. Az 5 mm-rel előzömített, $0,4 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű fémhab csövön belüli 30 mm-es lökethosszú mozgásához $0,51 \text{ kN}$ erőt kellett kifejteni a statikus súrlódási ellenállás leküzdéséhez, majd a mozgás során átlagosan $0,29 \text{ kN}$ átlagos erőre volt szükség a kinematikai súrlódás miatt. Ezek az értékek a 10 mm-rel előzömített hab esetében $0,31 \text{ kN}$ értékű kinematikus súrlódási ellenállás jelentett, míg a statikus értéke $0,97 \text{ kN}$ volt. A 15 mm-es előzömített hab előfeszített hab csövön belüli mozgása statikus ellenállás $1,47 \text{ kN}$ statikus ellenállást és $0,61 \text{ kN}$ kinematikai súrlódási ellenállást mutatott. A 20 mm-rel előterhelt hab esetében a statikus ellenállás $1,85 \text{ kN}$ volt, a kinematikus pedig $0,91 \text{ kN}$. Természetesen előfeszítés nélküli hab mozgásához szükséges energia meghatározása is fontos volt ezért ebben az esetben is rögzítettem a súrlódási ellenállás értékét. Számszerűen $0,2 \text{ kN}$ erőre volt szükség a statikus súrlódás leküzdéséhez és $0,06 \text{ kN}$ erőre a hab csövön belüli mozgásban tartáshoz.

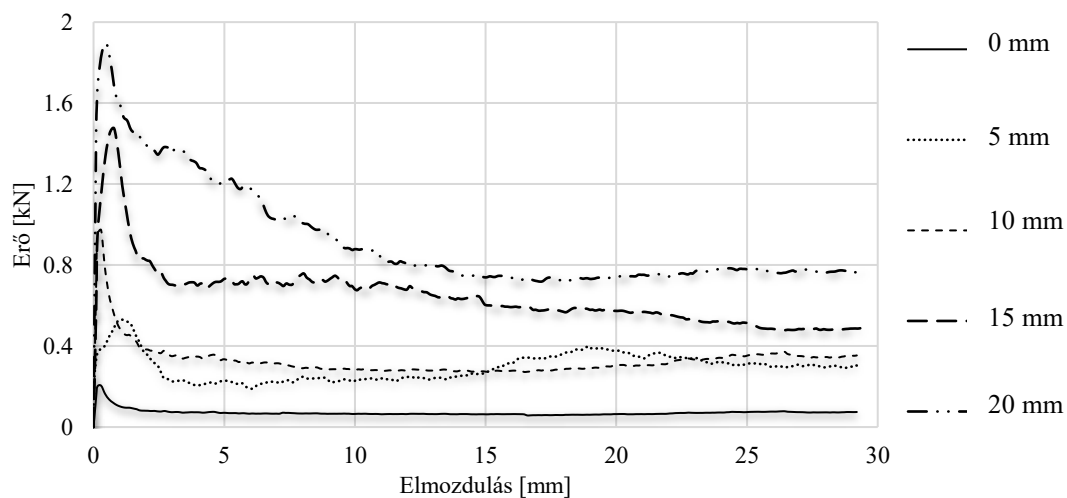
Ezután a súrlódásvizsgálati lépéseket megismételtem a $0,7 \text{ g/cm}^3$ habra vonatkozóan is. Ahogyan az várható volt, a súrlódási ellenállások ebben az esetben jelentősen nagyobbak voltak, mivel a próbatest kisebb porozitása miatt a deformáció során nagyobb sugárirányú normálerő ébred az $0,4 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű fémhabhoz képest. A vizsgálatot az összes előtömörített változatra vonatkozóan elvégeztem. A statikus súrlódási ellenállások rendre $0,87 \text{ kN}$, $7,89 \text{ kN}$; $10,05 \text{ kN}$ és $12,21 \text{ kN}$ voltak. Az előfeszítés nélküli próbatest mozgásakor pedig $0,53 \text{ kN}$ erőre volt szükség a statikus súrlódás leküzdéséhez, ami háromszorosa a $0,4 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű habnál tapasztalt értékhez képest. A próbatestek mozgásban tartásához szükséges erők, vagyis a kinematikus súrlódás leküzdése a következő erőket igényelte: $0,26 \text{ kN}$; $3,25 \text{ kN}$; $4,53 \text{ kN}$ és $5,77 \text{ kN}$. Az előfeszítés nélküli változat esetében a fémhab mozgásban tartása átlagosan $0,08 \text{ kN}$ erőt igényelt. A súrlódásmérés eredményeit lépésről lépésre a 32. ábraszorozat mutatja be, míg a 33. és a 34. ábra habtípusonként összegzi a súrlódási ellenállás mérésekor kapott

grafikonokat. Az 7. táblázat a statikus és kinematikus súrlódási ellenállás értékeit foglalja. A 15 mm-rel előzőmített habbal szerelt próbatestből súrlódás mérés után metszetet készítettem, hogy prezentálható legyen a hab végső pozíciója és a szárazsúrlódás okozta felületi hosszirányú bemaródások. A 35. ábrán látható a metszet, amely összehasonlítható az kezdeti vázlattal.

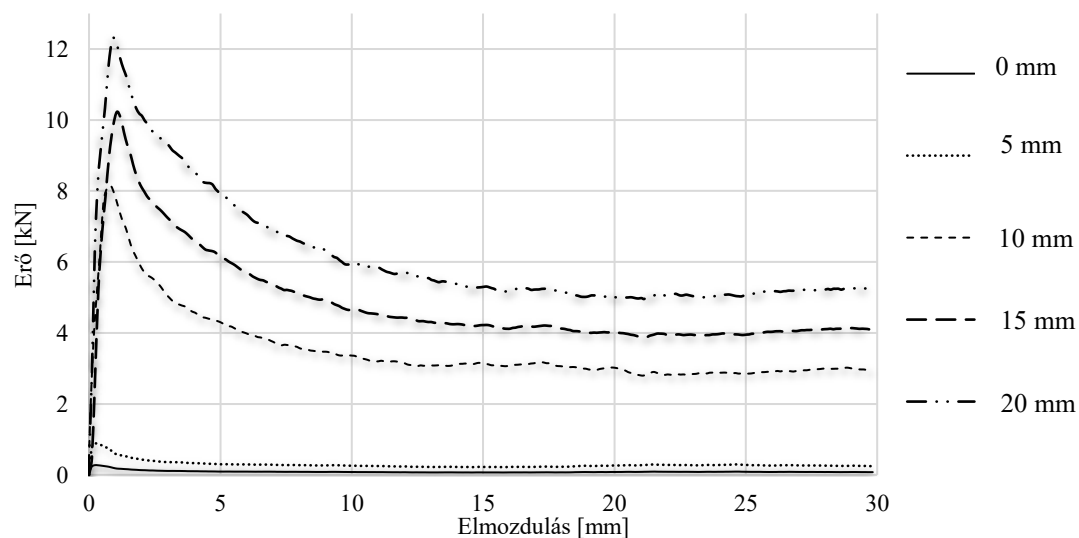




32. ábra A súrlódási ellenállás mérés sorozat a különböző mértékben előzőmített fémhab próbatestekkel [KJ118]



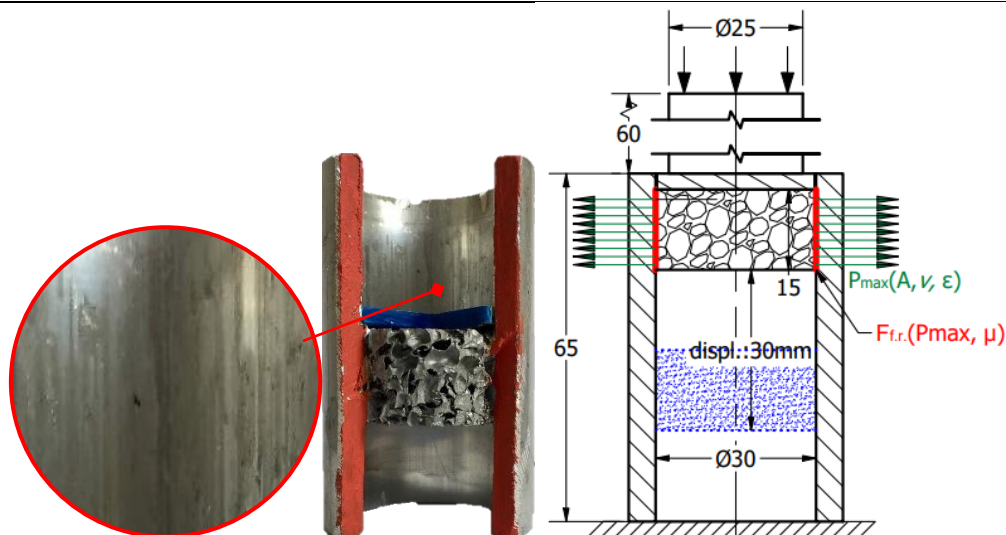
33. ábra A 0,4 g/cm³ típusú hab súrlódási ellenállása különböző mértékű előzőmítések függvényében [KJ118]



34. ábra A 0,7 g/cm³ típusú hab súrlódási ellenállása különböző mértékű előzőmítések függvényében [KJ118]

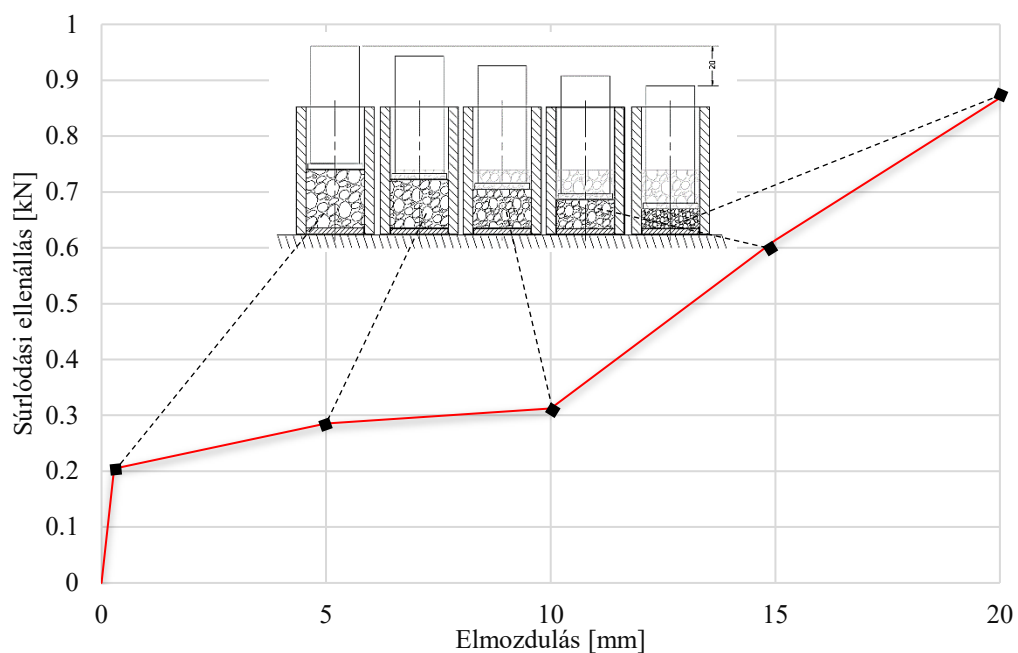
7. táblázat Súrlódási ellenállás értékei [KJ118]

Előzőmítés mértéke	Nyugvó súrlódási ellenállás [kN]		Kinematikai súrlódási ellenállás [kN]	
	0,4g/cm ³	0,7g/cm ³	0,4g/cm ³	0,7g/cm ³
0mm	0,21	0,53	0,06	0,08
5 mm	0,51	0,87	0,29	0,26
10 mm	0,97	7,89	0,32	3,25
15 mm	1,47	10,05	0,69	4,53
20 mm	1,85	12,21	0,91	5,77



35. ábra A súrlódási ellenállás mérés után készített metszet és a kezdeti vázlat [KJ118]

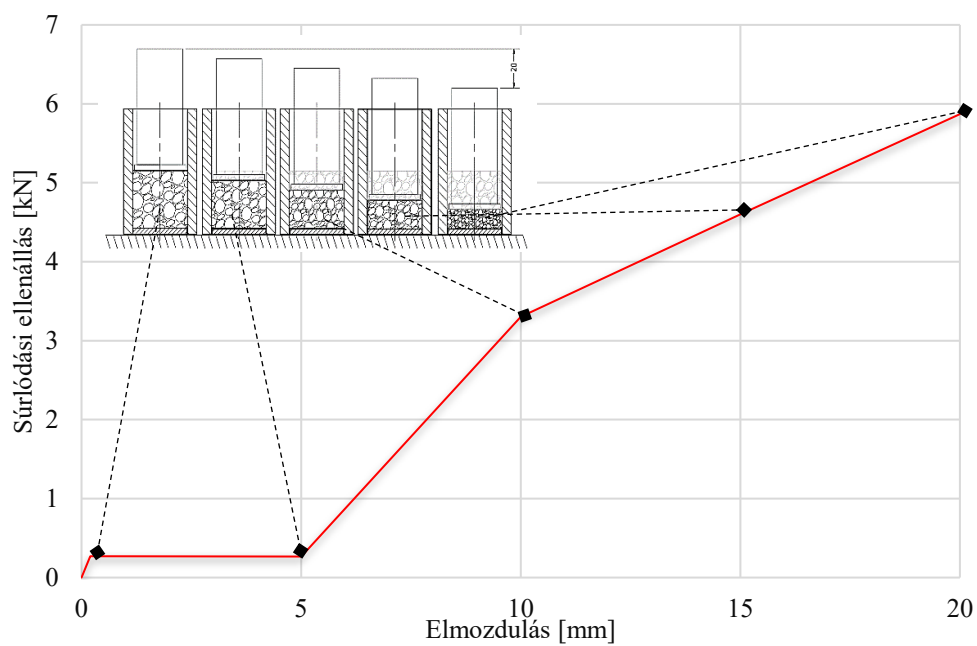
Az előzőmítés nélküli fémhabnál mért statikus súrlódási ellenállás és az előzőmített próbatesteknél mért kinematikus súrlódási erők alapján kiszerezhető az a súrlódási karakterisztika, amely a radiálisan gátolt zömítésnél jelentkezik. Ezeket a grafikonokat a 36. és a 37. ábra mutatja be. A csövön belüli zömítés természetesen egy nyugalmi súrlódási ellenállás leküzdésével indul meg, majd egy növekvő tendenciájú kinematikus súrlódási karakterisztikával folytatódik. Ennek magyarázata, hogy az axiális deformáció folyamatosan növekvő radiális irányú normálerőt (P_{max}) eredményez, ami magával vonja a súrlódási ellenállás növekedését is. A megszerkesztett súrlódási függvények hasznossága abban rejlik, hogy azok területi integráltjával kifejezhető a súrlódás leküzdéséhez szükséges energia. A 8. és 9. táblázatban foglaltam össze a súrlódás leküzdéséhez szükséges energiákat 5 mm-es lépésként.



36. ábra Súrlódási ellenállás a radiálisan gátolt zömítés során (0,4 g/cm³ fémhab esetén) [KJ118]

8. táblázat Energia szükséglet a fémhab és a cső fala közötti súrlódás leküzdéséhez (0,4 g/cm³ fémhab esetén) [KJ118]

Zömítési löket [mm]	Szabad zömítés	Radiálisan gátolt zömítés	Különbség	Energia szükséglet a súrlódás leküzdéséhez
0-5	20,87 J	23,86 J	2,99 J	1,18 J
0-10	43,48 J	53,37 J	9,89 J	2,67 J
0-15	68,88 J	94,42 J	25,54 J	4,99 J
0-20	97,51 J	149,79 J	52,28 J	8,69 J

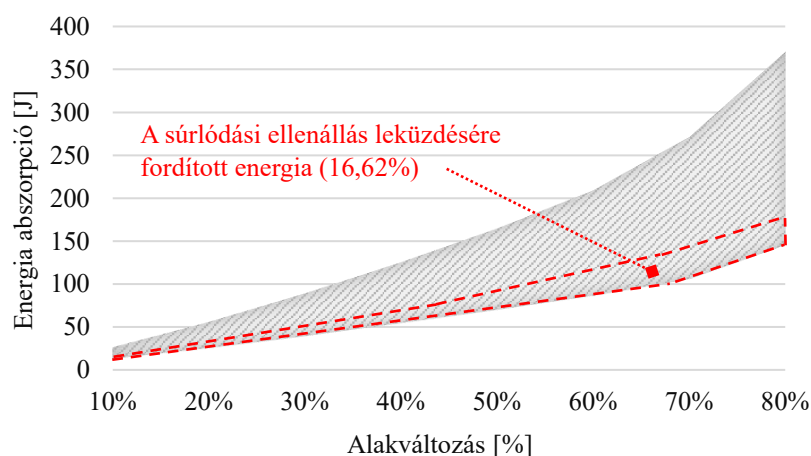


37. ábra Súrlódási ellenállás a radiálisan gátolt zömítés során (0,7 g/cm³ fémhab esetén) [KJ118]

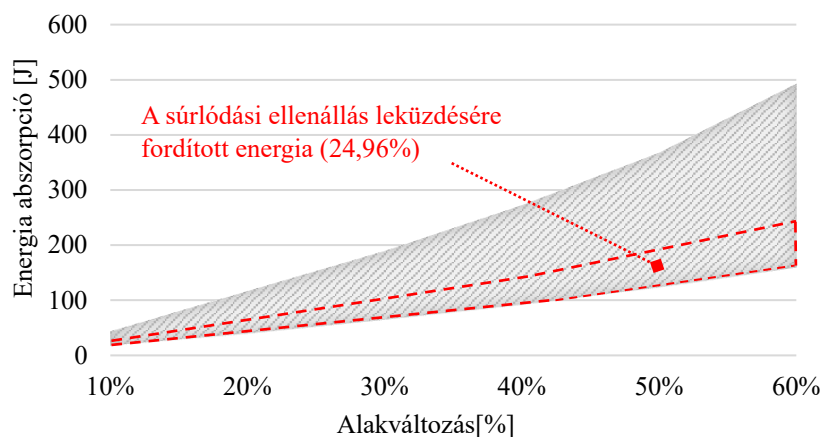
9. táblázat Energia szükséglet a fémhab és a cső fala közötti súrlódás leküzdéséhez (0,7 g/cm³ fémhab esetén) [KJ118]

Zömítési löket [mm]	Szabad zömítés	Radiálisan gátolt zömítés	Különbség	Energia szükséglet a súrlódás leküzdéséhez
0-5	31,53 J	59,84 J	28,31 J	1,32 J
0-10	72,21 J	142,93 J	70,72 J	10,25 J
0-15	121,54 J	244,03 J	122,49 J	30,01 J
0-20	190,03 J	415,18 J	225,03 J	56,17 J

A 0,4 g/cm³ típusú fémhab radiálisan gátolt 20 mm-es löketű zömítéséhez 149,79 J energiára volt szükség, ami 52,28 J energiával több, mint a szabadzömítésnél. A 36. ábrán látható súrlódási függvényt integrálva meghatározható volt a cső fala és a fémhab közötti súrlódási energia, melynek számszerű értéke 8,69 J. Ez a befektetett energia többlet 16,62 %-át jelenti. A 0,7 g/cm³ sűrűségű fémhab szabad zömítéséhez 190,03 J energiára volt szüksége 20 mm-es zömítési löket esetén. Ugyan ilyen mértékű axiális alakváltozást előidézve a csővön belül, már 415,18 J zömítési energiára volt szükség. A számítások alapján a súrlódási ellenállás leküzdéséhez 56,17 J energiára volt szükség a radiálisan gátolt zömítés során, amely a teljes energia többletnek a 24,96%-a. A 38. és 39. ábrán látható sraffozott területek a radiálisan gátolt zömítéshez szükséges energia többletet jelölik a szabadzömítéshez viszonyítva, az azon belüli piros terület pedig azt a hányadát, amely a súrlódási ellenállás leküzdésére fordítódik. A 0,4 g/cm³ típusú alumínium fémhab radiálisan gátolt zömítésnél elnyelt energiának 5,8 %-a palástsúrlódás miatt valósult meg, míg a 0,7 g/cm³ sűrűségű abszorbernél ez az érték 13,5 % volt. A párhuzamos zömítések eredményei milyen 8,24%-os és 11,44 %-os relatív szórást mutattak rendre a 0,4 és 0,7 g/cm³ fémhabok esetén, amely relatív szórást a 18. ábrán látható előzömítési diagramok is igazolnak.



38. ábra A radiálisan gátolt zömítéshez szükséges energia többlet és annak a súrlódási ellenállás okozta hányada (0,4 g/cm³ fémhab esetén)



39. ábra A radiálisan gátolt zömítéshez szükséges energia többlet és annak a súrlódási ellenállás okozta hányada (0,7 g/cm³ fémhab esetén)

5.8 A vizsgálatok alapján tett következtetések

A vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy a radiálisan gátolt zömítéshez nagyobb mértékű energia befektetés szükséges ugyan azon típusú hab, ugyan olyan mértékű deformációjához, egy szabad zömítéshez viszonyítva. Ennek egyik oka, hogy a radiális kényszer a hab radiális irányú szabadságfokainak számát csökkenti növelve ezzel a cellaszerkezet merevségét, vagyis az alakváltozással szembeni ellenállóképességét. A másik ok a hab és a cső fala között ébredő súrlódás, melynek leküzdése további energia igényt jelent a zömítés során. Ebben a kutatási fejezetben azt vizsgáltam, hogy radiális zömítésnél jelentkező energia abszorpciós többlet hány százalékát okozza a súrlódás.

A mérést kétféle sűrűségű habra vonatkozóan végeztem el, hogy az eredmények alapján általánosabb következtetést tudjak tenni. A mérés három részre különíthető el szabad; radiálisan gátolt zömítés és az előzömített fémhab próbatestek súrlódásellenállási vizsgálata. A szabad és radiálisan gátolt zömítést összehasonlítva információt kaptam a két koncepció közötti elnyelt energia különbözetéről, majd a súrlódási ellenállás mérésével kifejezhető volt, hogy a energia különbözet mekkora részét képezi a súrlódási ellenállás leküzdéséhez szükséges energia. Valamint kifejezhető, hogy a teljes energia abszorpció hány százaléka valósul meg a súrlódás által. Mikroszkópos felületvizsgálattal meghatároztam az adott habra jellemző cellaátmérőt és azok területi sűrűségét, hogy következtetni tudjak a két fémhab típus közötti kontaktfelület különbségre. Bár a nagyobb sűrűségű hab nagyobb súrlódási ellenállási értékeket jelentett, ennek oka nem csak - a mikroszkópos felületvizsgálattal és a felületszámtással meghatározott - kontakt felület különbsége okozta, hanem a nagyobb mértékű normálerő a zömítés során. Korábbi kutatások arról számoltak be, hogy radiálisan gátolt zömítésnél a fémhabot határoló cső falában ébredő normálerő arányosságot mutat az elmozdulás mértékével. Ez a

súrlódásméréssel is igazolható volt, hiszen a nagyobb sűrűségű hab, annak kisebb porozitása miatt az axiális deformáció jelentősebb radiális alakváltozást és ezáltal nagyobb súrlódási ellenállást eredményezett. A porozitás fontossága azonban ebben a mérésben is megfigyelhető, hiszen radiálisan gátolt zömítés erődiagramjaiból (28-29. ábra) leolvasható, hogy például a 15 mm zömítési úthoz közelítően 8 és 25 kN erő tartozik a kétféle sűrűségű habra, tehát a különbség nagyságrendileg háromszoros. Ugyanakkor a nyugvó és kinematikai súrlódási ellenállások között erre a zömítési mértékű próbatestre 7-8-szoros különbségek adódnak habonként. A kisebb porozitású hab szerkezeten belüli cella deformációjának lehetősége kisebb, így az előzömítéssel egy merevebb sűrűbb szerkezet jön létre, amely több kontaktust eredményez a cső fala és a hab között magával vonva ezzel a súrlódási ellenállás növekedését is. Ráadásul a 28. és a 29. ábrát összevetve megfigyelhetjük, hogy a $0,7 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű hab esetén sokkal korábban létrejön a felkeményedés, vagyis lényegében tömör anyagként kezd viselkedni attól a ponttól, így érthető, hogy a Poisson hatás még jobban érvényesül és a nagyobb kontaktfelületet mellett nagyobb radiális irányú erő is ébred. Megállapítható tehát, hogy amíg a zömítőerő a sűrűséggel arányosan nő, a súrlódás komplexebb módon, a kontaktmechanika változásán keresztül sokkal intenzívebben változik. Mivel a mérések eredményei arra engednek következtetni, hogy súrlódási ellenállást a porózus anyag és a cső fala között érvényesülő kontaktmechanika is meghatározza ezért a klasszikus Coulomb féle súrlódást leíró összefüggés (27) helyett egy pontosabb modell megalkotása lenne szükséges, ami az adhéziót, sejtszerkezet-betapadást, vagy akár mikroszkopikus deformációkat is figyelembe veszi.

A mérési eredmények alapján egy súrlódási tényezőt becsülő modell megalkotása elméletileg lehetséges, azonban ehhez további célzott vizsgálatok szükségesek. Például a csőfalra ható radiális erő közvetlen mérése (pl. nyúlásmérő bélyegekkel), valamint a hab és a cső deformációjának pontos nyomon követése elengedhetetlen. Emellett célszerű és szükséges lenne különböző felületi érdességű csöveket alkalmazni, és a méréseket különböző sűrűségű fémhabokra is kiterjeszteni, hogy a modell statisztikai alapokon is jól illeszthető legyen. Így egy olyan kontaktmechanikai modell jöhetne létre, amely a normálerő, porozitás és felületi paraméterek figyelembevételével közelítőleg képes lenne meghatározni a súrlódási tényezőt. A feladat komplexitását még tovább növeli az a tény, hogy a zömítés kezdetén a hab porózus szerkezetétől a zömítés végéig olyan zömítést szenved el, amitől már tömör szerkezetű anyagként viselkedik, így a súrlódási együttható meghatározása a zömítés mentén szintén komplex feladattá válik.

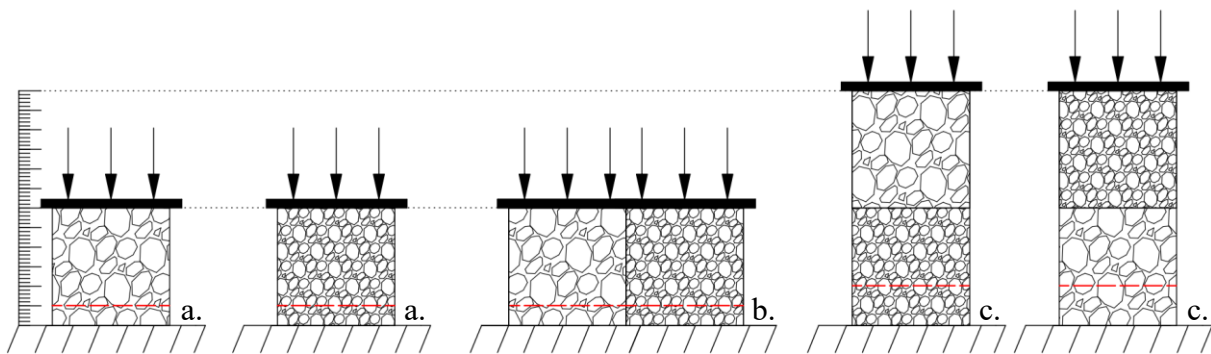
5.9 Tézis

Laboratóriumi méréssel igazoltam, hogy zártcellás 0,4 és 0,7 g/cm³ sűrűségű alumínium fémhabok radiálisan gátolt zömítéséhez - átlagosan 53,6 % - al több mechanikai energiára van szükség szabad zömítésükhöz képest. Méréssel meghatároztam, hogy a radiálisan gátolt zömítés során jelentkező mechanikai energia abszorpció többlett egy jelentős részét – átlagosan 20,79 %-át – a cső belső felülete és a fémhab között ébredő súrlódási ellenállás okozza. A mérések eredményei alapján megállapítottam, hogy a súrlódási ellenállás mértékét a fémhab és a cső fala között ébredő súrlódási együttható, valamint a fémhab porozitása és a kontaktmechanizmus határozza meg. Az elvégzett mérések igazolták, hogy a belső zömítésű, fémhabbal töltött crashbox szerkezetek energia abszorpciós képessége, és ezáltal ütközésbiztonsági hatásfokuk növelhető a súrlódási paraméterek növelésével, ez azt jelenti, hogy tömegnövelés nélkül is fokozható egy gyűrődő elem energia elnyelő képessége. [KJ118], [KJ125], [KJ126], [KJ127].

6. Fémhabok zömítése soros és párhuzamos koncepcióban

A kutatásom egyik fő célja egy olyan lökhárítórendszerekben és aláfutásgátló rendszerekben alkalmazható alacsonysebességű ütközésre optimalizált energiaelnyelő konstrukció kidolgozása volt, amely alkalmas arra, hogy a töltésként alkalmazott, de eltérő sűrűségű fémhabokat egyidejűleg zömítsük az ütközés során. Ezért fontos volt megvizsgálnom, hogy hogyan változnak az energia viszonyok eltérő típusú fémhabok egyidejű zömítése esetén.

Mivel hasonló adatokról nem találtam információt a szakirodalomban, ezért első lépésként definiálnom kellett a - fizika tudományában a rugós szerkezeteknél is használatos - soros és párhuzamos elrendezés fogalmát fémhabok zömítésére vonatkozóan. A párhuzamos elrendezést azzal jellemezve, hogy az eltérő sűrűségű fémhab próbatesteket közvetlenül egymás mellé helyezzük, és zömítésük egyidejűleg történik. Ezzel szemben a soros elrendezés koncepció esetében az eltérő sűrűségű elemeket már közvetlenül egymásra helyezzük [KJ122], [KJ123]. Az 40. ábrán látható, hogy a soros és párhuzamos elrendezés a rugók vizsgálatánál is alkalmazott definícióját követi és alkalmazza.



40. ábra A soros és párhuzamos elrendezések értelmezése fémhabok zömítése esetén
(b. önálló szabad zömítés; b. párhuzamos elrendezés; c. soros elrendezés variációi)

A soros és párhuzamos koncepcióval kapcsolatos mérésekhez két különböző sűrűségű (0,4 és 0,7 g/cm³) zártcellás alumínium fémhabot alkalmaztam. Ezek a próbatestek megegyeznek a sűrűdési ellenállás vizsgálatánál használt fémhabokkal. A jelen fejezetben azonban a 0,43 és 0,68 g/cm³ értéket használom, mivel ezek szerepelnek a témához kapcsolódó, korábban megjelent publikációimban is, ahol a sűrűségeket két tizedesjegy pontossággal tüntettem fel. A két különböző érték közötti eltérés tehát nem szakmai ellentmondás, vagy eltérő alapanyagot jelent, hanem kerekítés kérdése, és így az alkalmazott értékek megfelelnek a korábbi publikációs gyakorlatnak. Mindazonáltal a soros elrendezésű koncepció zömítése a várthoz és a szabadzömítésnél megszokott karakterisztikához képest egy eltérő erő-elmozdulás görbét eredményezett, ezért szükségesnek tartottam egy kontroll mérést. A kontroll vizsgálatához az eredeti fémhabokhoz képest alacsonyabb sűrűségű változatokat választottam, számszerűen 0,22 és 0,35 g/cm³. Azért ezekre a típusokra esett a választásom, mert így a mérés során kapott karakterisztikát függetleníteni tudtam a fémhabok sűrűségétől, azonban az arányuk mindkét párosításban $\beta = 1:1,6$ maradt (28). Ezért utólagosan a mérési folyamat első lépését, vagyis a szabad zömítéseket a kontroll méréshez használt fémhabokra is szükséges volt elvégezni. Az összeállításon belüli sűrűség arányt a (29) és (30) képletek mutatják.

$$\beta = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (28)$$

$$\beta = \frac{0,43 \text{ g/cm}^3}{0,68 \text{ g/cm}^3} \cong \frac{1}{1,6} \quad (29)$$

$$\beta = \frac{0,22 \text{ g/cm}^3}{0,35 \text{ g/cm}^3} \cong \frac{1}{1,6} \quad (30)$$

Sűrűségtől függetlenül a próbadarabokat vízszintes vágás segítségével 30 mm átmérőjűre és 30 mm magasságúra készítettem, majd ezek dimenzióit és tömegét ellenőriztem, hogy a gyártó által megadott sűrűségi értékeket ellenőrizni tudjam.

6.1 A mérés menete

Első lépésben a fémhabok önálló szabad zömítése történt 25 mm-es alakváltozással, 1 mm/s sebességű szabad zömítéssel. A mérés során rögzített erő-elmozdulás diagramoknak köszönhetően kiszámítható a zömítéshez szükséges, vagyis az elnyelt energia értéke. Majd a próbadarabokat a 40. ábrán látható elrendezésben ismét 83 %-os névleges alakváltozásig terheltem. Ez a párhuzamos elrendezésben 25 mm-es, míg a soros elrendezésben 50 mm-es elmozdulást jelent. Az így kapott erő-elmozdulás diagramok alapján számított energia összevethető a koncepciót alkotó fémhaboknál egyenként mért energia abszorpciós értékeinek matematikai összegével. A soros koncepció lehetőséget ad arra, hogy az alkalmazott fémhabok sorrendjét felcseréljük, és megvizsgáljuk ennek esetleges hatását.

6.2 Szabad zömítés eredményei

Az eredmények ismertetése előtt fontos megjegyezni, hogy minden mérést háromszor ismételt meg, így minden, a továbbiakban szereplő eredményre vonatkozó értékek a három ismétlődő mérés átlagát jelentik. A 41. ábrán látható diagram a 4 féle hab szabad zömítés során kapott erő-elmozdulás karakterisztikáját mutatja. Sűrűségtől függetlenül jól megfigyelhető valamennyi esetben a fémhabokra jellemző három fő szekció, a kezdeti lineárisan rugalmas szakasz, a plató szakasz és a felkeményedési zóna. A próbatestek porozitása egyértelmű összefüggést mutat az általunk elnyelni képes energia mennyiséggel és merevségi értékekkel. A vizsgálatot és a kapott eredmények kiértékelését az ISO13314:2011 szabvány figyelembevételével történt. A 0,22 g/cm³ sűrűségű hab zömítésekor 1,07 kN zömítő erőre volt szükség, hogy a maradó deformáció megjelenjen annak szerkezetében. Ez az érték 1,84 kN volt a 0,36 típusú habnál, 5,66 kN a 0,43 sűrűségű fémhabnál és 7,94 kN a 0,68 típusú fémhab próbatestnél. A platószakaszt jellemző erő vagyis a 20 és 40 %-os alakváltozás közötti átlagos érték rendre 0,93; 1,85; 4,87 és 8,61 kN erő volt. Az elnyelt energia mennyiség a görbe alatti terület meghatározásával történik. A próbatestek zömítéséhez szükséges energia értékeket, Joule mértékegységben kifejezve a 10. táblázat foglalja össze a névleges alakváltozás függvényében.

10. táblázat A vizsgálatához használt fémhabok energia elnyelő képessége az alakváltozás függvényében [KJ123]

Névleges alakváltozás [%]	Zömítéshez szükséges energia [J]			
	0-20	0-40	0-60	0-80
0,22	8,89	14,97	22,27	49,71
0,35	9,19	20,31	36,09	82,56
0,43	25,39	54,36	85,94	126,51

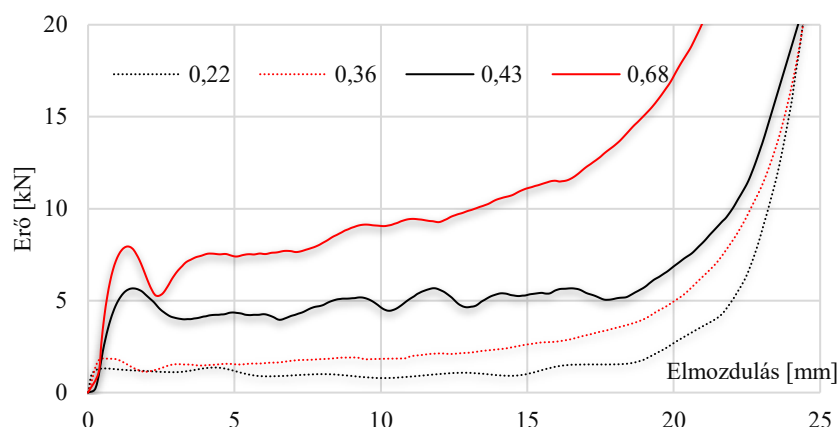
0,68

41,54

91,93

159,04

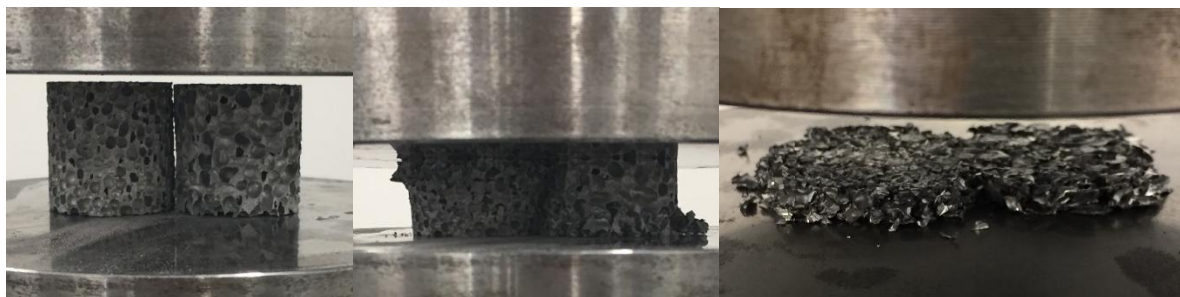
304,94



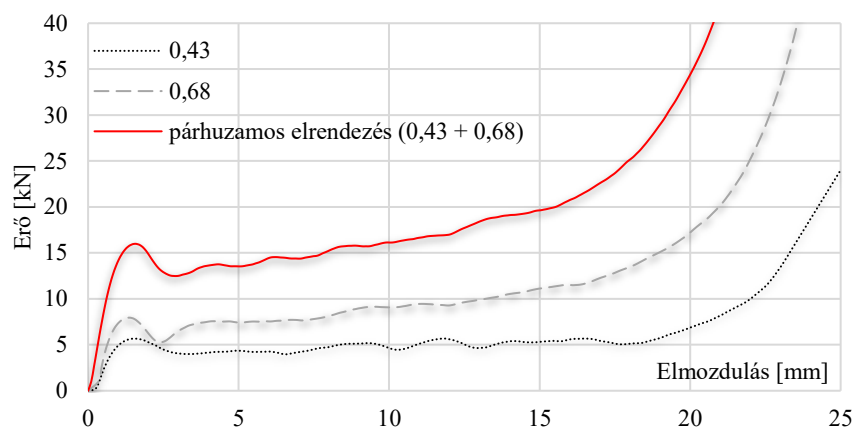
41. ábra Fémhabok szabadzömítési karakterisztikája [KJ123]

6.3 Párhuzamos elrendezésű koncepció mérési eredményei

A következőkben a párhuzamos elrendezésben vizsgált próbatestek mérési eredményeit ismertetem. A zömítés jellemzőit nem módosítottam, azok megegyeztek az előző fejezetben ismertetett szabad zömítés jellemzőivel, hogy releváns összehasonlítást tessenek az energia értékekre vonatkozóan. A mérés igazolta, hogy a párhuzamosan elrendezésű koncepcióban jelentkező energia abszorpció nem egyezik meg az alkotó elemek egyenként mért energia értékek matematikai összegével. Hiszen, azonos alakváltozás mellett a párhuzamos konstrukció 21,5%-al több energiát képes elnyelni, mint a konstrukciót alkotó fémhabok matematikai összege. A különbség a zömítés előrehaladtával növekvő tendenciát mutat, a legnagyobb eltérés a platószakasz második felében és a sűrűsödési zónában volt tapasztalható. A mérés során rögzített képeket és diagramokat mutatja a 42. és a 43. ábra. A koncepció energia abszorpciós előnyét a próbatest tömegéhez viszonyítva is érdemes megvizsgálni, vagyis az úgynevezett SEA (Specific Energy Absorbing) érték meghatározása szükséges. Ezek alapján az alacsonyabb sűrűségű hab tömegre vetített energia abszorpciós értéke 13,69 J/g, a 0,68 g/cm³ sűrűségű fémhabé pedig 21,70 J/g. A párhuzamos konstrukció esetében pedig ez az érték 23,55 J/g. Az eredményeket az áttekinthetőség érdekében a 11. táblázatban foglaltam össze.



42. ábra Párhuzamos elrendezés zömítésének folyamata [KJ123]



43. ábra Fémhabok zömítési karakterisztikája párhuzamos elrendezés esetén [KJ123]

11. táblázat A párhuzamos elrendezésű konstrukció energia abszorpciója [KJ123]

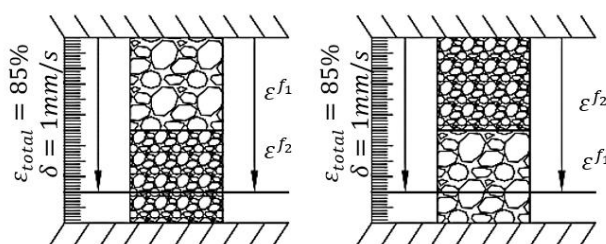
Névleges alakváltozás [%]	Zömítéshez szükséges energia [J]				Tömeg [g]	SEA [J/g]
	0-20	0-40	0-60	0-80		
0,43	25,39	54,36	85,94	126,51	9,24	13,69
0,68	41,54	91,93	159,04	304,94	14,05	21,70
Matematikai összegük	66,93	146,29	244,98	431,45	23,29	18,52
Párhuzamos elrendezés	79,51	177,19	300,49	548,57	23,29	23,55
Különbség	12,58	30,9	55,51	117,12	-	5,03

6.4 Zömítés soros elrendezésben

A következőkben a soros elrendezésű koncepció mérési eredményeit ismertetem, amely négy allépésre volt osztható. Elsőként a 0,43 és 0,68 g/cm³ sűrűségű fémhabból készített soros elrendezést vizsgáltam, olyan sorrendben, hogy alul helyezkedett el a nagyobb sűrűségű fémhab, rajta pedig az alacsonyabb sűrűségű változat. A vizsgálat során használt koncepcióról készített kép a 44. ábrán látható, az elrendezés sematikus vázlatát pedig a 45. ábra mutatja. A mérés folytatásaként az előbbi sorrendet felcseréltem, hogy meg tudjam vizsgálni, van-e hatása a konstrukciót alkotó fémhab próbatestek sorrendjének a szerkezet energia abszorpciós viselkedésére és a gyűrődési karakterisztikára. Azonban ahogy az a bevezetőben is említésre került a sorosan kapcsolt próbatestek alkotta koncepciók gyűrődési karakterisztikája eltért a hagyományos szabadzömítésre jellemző karakterisztikákhoz viszonyítva, ezért a mérést megismételtem a másik két típusú hab alkotta konstrukcióval is, hasonlóan mindkét sorrendben.



44. ábra A vizsgálatához használt fémhab próbatestek a zömítés előtt [KJ123]

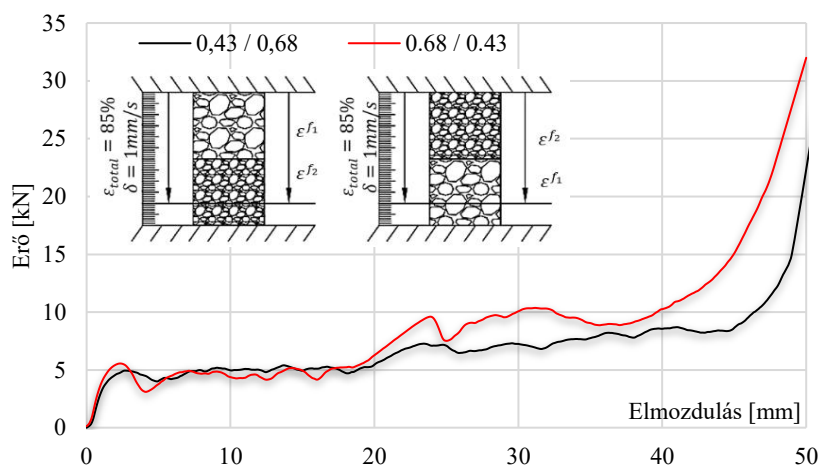


45. ábra A soros elrendezés zömítési kondíciói [KJ122] [KJ123]

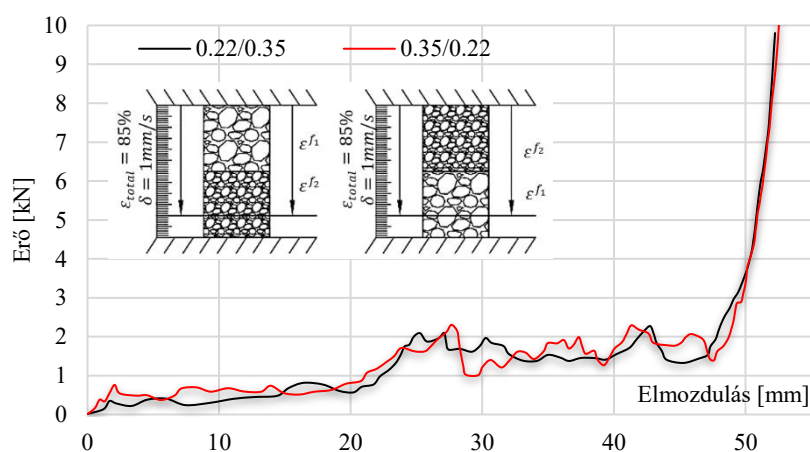
6.5 Soros elrendezésű zömítés eredményeinek ismertetése

A két darab, egyenként 30 mm magas próbadarab egymásra helyezve 60 mm, ezért 50 mm-es elmozdulást állítottam be a vizsgáló gépen, ahhoz, hogy az eddig is alkalmazott több, mint 80%-os névleges alakváltozást tartani tudjam. A soros konstrukciót alkotó fémhabok sorrendjétől függetlenül, a zömülés mindkét esetben az alacsonyabb ($0,43 \text{ g/cm}^3$) sűrűségű hab esetében indult meg. A plasztikus deformáció megjelenéséhez 4,94 kN erő elérése volt szükséges, vagyis nem mutatott lényeges eltérést a szabadzömítésnél mért 5,66 kN-os erőhöz képest. Az alacsonyabb sűrűségű hab zömülése a platószakasz mentén folytatódott, és a 20 mm-es névleges elmozdulásnál kezdődött meg a cellák összezárása, vagyis a fémhab felkeményedése. Ez a felkeményedés egybeesik a nagyobb sűrűségű hab lineárisan rugalmas karakterisztikájával, mely 7,23 kN erőnél éri el a maximumát és kezdődik meg annak maradó deformációja egy újabb plató szakasz mentén, immáron azonban a nagyobb sűrűsége miatt egy nagyobb energia szinten. A konstrukció tényleges felkeményedése 47 mm-es elmozdulásnál kezdődött meg, ami 78 %-os névleges alakváltozást jelent, amelyet egy meredeken emelkedő karakterisztika követ. A fémhabok sorrendjének módosítása ellenére a gyűrődési karakterisztika nem változott, hasonlóan jól megfigyelhető és elkülöníthető a két plató szakasz és a kisebb sűrűségű fémhab felkeményedése, amely egybe esik a $0,68 \text{ g/cm}^3$ típusú alumínium hab kezdeti lineárisan rugalmas szakaszával. Azonban itt a második plató szakasz egy nagyobb energia befektetést igényelt és a konstrukció végleges felkeményedése 43 mm-nél indult meg.

A mérés során rögzített grafikonokat a 46. és 47. ábra szemlélteti. A konstrukció által elnyelt energia értékeket pedig a 12. táblázat részletezi, szintén a szabadzömítési eredményekhez és a próbadarabok tömegéhez viszonyítva.



46. ábra A soros elrendezés zömítési karakterisztikája [KJ123]



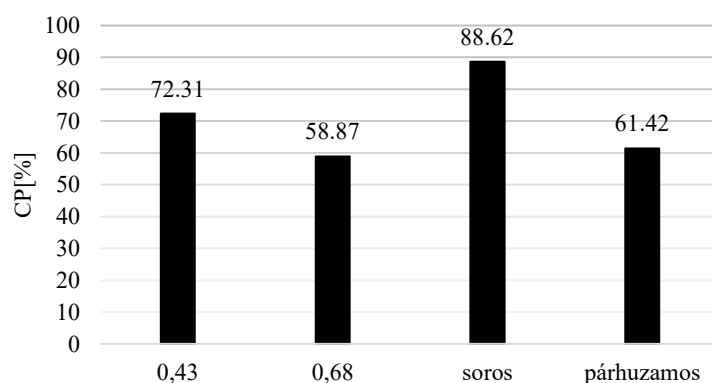
47. ábra A soros elrendezésre vonatkozó ellenőrző mérés eredménye [KJ123]

12. táblázat A soros elrendezésű fémhab konstrukció energia abszorpciója [KJ123]

Névleges alakváltozás [%]	Zömítéshez szükséges energia [J]				Tömeg [g]	SEA [J/g]
	0-20	0-40	0-60	0-80		
0,43	25,39	54,36	85,94	126,51	9,24	13,69
0,68	41,54	91,93	159,04	304,94	14,05	21,70
Matematikai összegük	66,93	146,29	244,98	431,45	23,29	18,52
Soros kivitel (0,43/0,68)	53,44	120,73	207,19	313,51	23,29	13,46
Soros kivitel (0,68/0,43)	51,72	124,61	236,82	392,75	23,29	17,07

6.6 Plasztikus deformációra jutó energiahányad

Az energia abszorpció érdemi része a plasztikus deformáció által kell, hogy megvalósuljon, ezért a CP (Capacity of Plastic) értékkel kifejezhetjük, hogy a teljes zömítés során elnyelt energia hány százaléka történt a plasztikus deformáció szakaszában. A következő diagramon (48. ábra) összefoglaltam a habok egyenként számított, valamint a soros és párhuzamos elrendezés CP értékeit. A ütköző elemekben használt fémhabok felkeményedése esetén a cellák teljes zömülése miatt a hab szerkezete már alkalmassá válik az ütközési energia továbbítására az utascella felé, ezért a CP érték számítását a felkeményedés előtti állapotig, vagyis a plató szakasz végéig határoztam meg. A plató szakasz végpontjának meghatározása pedig az ISO 13314:2011 szabvány előírása alapján történt [117].



48. ábra A plasztikus deformáció abszorpciós kapacitása 80%-hoz viszonyítva

Ahhoz, hogy a mérés során kapott karakterisztikát általánosítani lehessen a soros konstrukcióra vonatkozóan kontroll mérést végeztem. Az eltérő sűrűségű fémhabok ellenére megegyező karakterisztikákat kaptam, vagyis ennél az esetnél is megfigyelhető a két plató szakasz és a felkeményedési állapotokat jellemző karakterisztika, vagyis általánosítható a soros elrendezésre.

6.7 Fémhabok vizsgálata összetett soros elrendezésben

A soros elrendezés vizsgálatát további egy modullal bővítettem, ahol a kisebb sűrűségű ($0,43 \text{ g/cm}^3$) fémhabból készült próbatest zömítése két darab nagyobb sűrűségű ($0,68 \text{ g/cm}^3$) fémhab tömb között történt. Ez azt jelenti, hogy három darab 30 mm átmérőjű próbadarabot helyeztem el egymáson így alkotva egy összetett soros elrendezést. A vizsgálat célja az volt, hogy megvizsgáljam a koncepció zömülésének sorrendjét és a gyűrődési jellemzők változását az előző elrendezésekhez képest, valamint, hogy információt kapjak arról, hogy a próbatestek számának növelése arányosan növeli-e a plató szakasz, vagyis a hasznos plasztikus deformációs

teljesítményt soros elrendezésben. Mivel a három egymásra helyezett fémhab próbatest együttes magassága 90 mm volt, ezért a vizsgálógép zömítési lökethosszát 80 mm-re növeltem.

A zömítés ebben az esetben is a kisebb sűrűségű hab deformációjával kezdődött, majd annak a felkeményedése után indult meg az alatta és a felette lévő próbadarabok zömülése. Viszont annak ellenére, hogy azok sűrűsége megegyezett, a sorrendet tekintve mégis a felső hab zömülése történt meg hamarabb, amely ellentmondott a mérést megelőző zömülési sorrendre vonatkozó feltételezésemnek. A zömülés folyamata a 49. ábrán látható, melynek negyedik lépésétől jól megfigyelhető, hogy a felső és alsó fémhab külön zömült, annak ellenére, hogy azonos típusúak voltak.

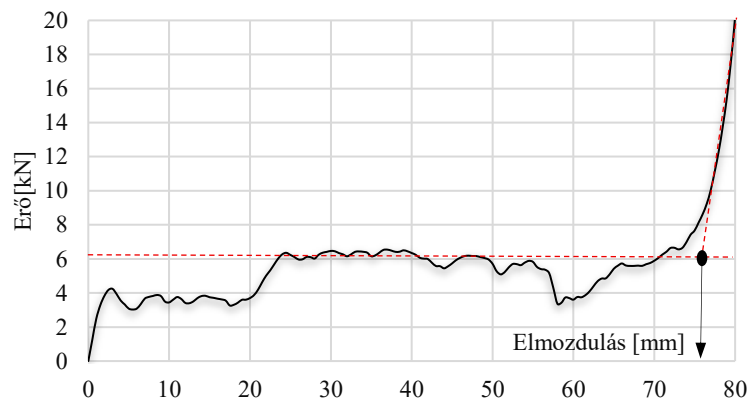


49. ábra A háromtagú soros elrendezés zömülése képekben

A két tagú soros elrendezéshez képest, ebben az összeállításban a kisebb sűrűségű hab mindkét végén fémhabbal kapcsolódik, ezáltal nagyobb súrlódás ébred az érintkezési felületek deformálódott cellái között. Ebből előzetesen arra következtettem, hogy a két tagú elrendezéshez képest nagyobb zömítési energiára lesz szükség a fellépő súrlódási ellenállások miatt, ami az EA, SEA értékekben is megmutatkozna. Viszont a számított abszorpciós értékek ezt a hipotézist csak részlegesen támasztották alá. Az alábbi 13. táblázatban a két tagú soros elrendezéssel való összehasonlítás érdekében összegyűjtöttem a kapott energia értékeket. Ahogy a két tagú soros elrendezésnél sem, itt sem egyezett meg a koncepciót felépítő habok egyenként mért matematikai összege és a tényleges mérési eredmények. Mivel az abszorpciós értékek elmaradtak a vártaktól, ezért a mérést megismétltem. A 50. ábrán látható karakterisztika és a 13. táblázat adatai ebben az esetben is az ismétlődő mérések átlagát mutatják.

Az első 20 %-os alakváltozásban a közepén lévő kisebb sűrűségű hab zömült, ami 22 %-al több zömítési energiát igényelt a két tagúhoz viszonyítva, tehát igazoltan megjelent a súrlódási ellenállás okozta különbség. 40 %-os alakváltozásig az összetett soros elrendezés 34 %-al több energiát nyelt el, miközben a kisebb sűrűségű hab már teljesen szétmorzsolódott.

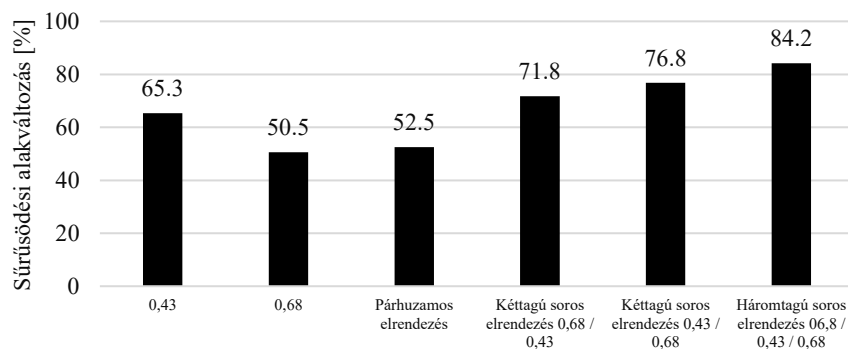
A zömítés utolsó harmadában az energia értékek elmaradtak a vártakhoz képest, sőt még kisebb értékeket is mutatott az összetett soros elrendezés. Ha a 80 %-os alakváltozásig számított értéket vesszük alapul, akkor a két tagból álló soros elrendezés lényegesebb jobb SEA értéket mutatott, hiszen a 15,27 J/g értékhez képest a háromtagú csak 9,78 J/g abszorpcióra volt képes. Mivel a nem várt negatív irányú eltérés érdemi része a zömítés utolsó harmadában jelentkezett, ezért fontosnak tartottam a plasztikus deformációra jutó energia hányad alapján történő összehasonlítást is. Ehhez elsőként a sűrűsödési állapot kezdetének meghatározása volt szükséges. A felkeményedési, másnéven sűrűsödési alakváltozást (ϵ_d) az ISO 13314:2011 szabványnak megfelelően platószakaszra illesztett egyenes és a meredeken emelkedő felkeményedési szakaszra illesztett egyenes metszéspontjával definiálom, amelyet a 49. ábrán piros szaggatott vonallal jelölök. Mivel a platószakasz átlagos zömítési erő értéke 6,36 kN volt, így az illeszkedő egyenesek metszéspontját figyelembe véve a platószakasz vége oda tehető, ahol a függvény eléri a 8,27 kN erőt. Ez alakváltozásban kifejezve (ϵ_d) 84,98 %-ot jelent, ami jelentősen nagyobb a fémhabok önálló zömítésénél tapasztalt értékekhez képest. A felkeményedési alakváltozás (ϵ_d) alakulását a 51. ábrán látható diagramon ábrázoltam. A három tagú soros elrendezés plasztikus deformációjára jutó energia hányad 81,62 % volt, amely 8 %-al kevesebb, a két tagú elrendezésnél számított értékhez képest.



50. ábra A háromtagú soros elrendezés zömülési karakterisztikája

13. táblázat Az összetett soros elrendezés energia abszorpciója

Névleges alakváltozás [%]	Zömítéshez szükséges energia [J]				Tömeg [g]	SEA [J/g]
	0-20	0-40	0-60	0-80		
Három tagú soros kivitel (0,68/0,43/0,68)	63,88	167,41	274,26	365,51	37,34	9,78
Két tagú soros kivitel (0,68/0,43)	52,20	124,61	241,83	397,75	23,29	17,07



51. ábra A sűrűsödési alakváltozás alakulása a koncepciók függvényében

6.8 A mérés alapján tett következtetések

A fémhabok zömítésénél az energia abszorpciót és gyűrődési viselkedést nem csak a fémhabok sűrűsége, hanem azok egymáshoz viszonyított helyzete is meghatározza. A rugómerevségekre vonatkozó méréseknél és számításoknál használatos soros és párhuzamos elrendezések, mint fogalmak ugyan érvényesíthetők a fémhab konstrukciókra, azonban a mögöttük lévő törvényszerűségek nem. Hiszen a fémhabok párhuzamos elrendezésben, több energia abszorpcióra képesek, mint a feltételezett egyenként mért energia értékek matematikai összege. A párhuzamos elrendezés közel 22 %-al több energia befektetést igényelt, mint a konstrukciót alkotó fémhaboknál mért értékek összege. A soros elrendezés esetén a fémhabok zömülése időben elkülönül, a sorrendtől függetlenül az alacsonyabb sűrűségű hab deformációja indul meg először. Azonban az elrendezés adta karakterisztika jellegzetessége, hogy két platószakasz alakul ki a zömítés során, és a felkeményedés több mint, 20 %-al később jelentkezik. Bármely konstrukciót is vesszük alapul fontos megemlíteni, hogy a zömülés során a fémhab hengerek között súrlódás alakul ki, amely növeli az alakváltozással szembeni ellenállást. Ezt a súrlódási ellenállást igazolja a három próbadarabból összeállított soros konstrukció. A zömítő mérések igazolták, hogy sem a soros sem a párhuzamos fémhab konstrukciókra nem érvényesíthetők a cellamerevségre és energia abszorpciós képességekre vonatkozó matematikai összefüggések, hiszen a párhuzamos elrendezés pozitív irányban tért el az elméleti matematikai összegektől, a soros elrendezések pedig negatív irányba. A háromtagú soros elrendezésen végzett vizsgálattal az is igazolhatóvá vált, hogy önálló tömbként, szabad zömítésben használt soros elrendezésű abszorberek energia elnyelő képességének változása nem arányos a tagok számának növelésével. Vagyis az összeállítás energia elnyelő képessége előre nem határozható meg csupán a tagok energia abszorpciós képessége alapján.

6.9 Tézis

Definiáltam a soros és párhuzamos zömítés fogalmát zártcellás alumínium fémhabok szabad zömítésére vonatkozóan. Soros elrendezés esetében a két különböző sűrűségű (0,4 és 0,7 g/cm³) zártcellás fémhabból készült próbatesteket egymásra, a párhuzamos elrendezés esetén pedig közvetlenül egymás mellé helyezzük. A párhuzamos elrendezésű konstrukció 21,5 %-al több energiát képes elnyelni, az alacsonyabb és nagyobb sűrűségű hab egyenként mért abszorpciós értékének matematikai összegéhez képest. A soros elrendezés előnye, hogy - az energia abszorpció tekintetében kiemelt fontosságú - plató szakasz átlagosan 40%-al hosszabb lefutású, amely a plasztikus deformációra jutó elnyelt energia hányad (CP) értékével is igazolható, hiszen ezen elrendezés esetén ennek értéke 22 %-al nőtt. A soros és párhuzamos elrendezések passzívbiztonsági karosszéria elemekben alkalmazva alkalmas a biztonság fokozására, nagyobb energia abszorpciós képességük, és a soros elrendezés adta kétlépcsős plató szakasz révén. [KJ122], [KJ123]

7. Crashbox szerkezetek gyűrődési karakterisztikájának VEM vizsgálata és optimalizálása

A lökhárító rendszerek energia elnyelő elemeként funkcionál crashbox szerkezetek gyűrődési tulajdonságai nagymértékben meghatározzák az ütközés lefolyását, és ezáltal a járműben utazók személyi sérülésének mértékét is. A gyűrődési tulajdonság és a plasztikus deformáció kezdete több megoldással is optimalizálható, mint pl. falvastagság módosítás, keresztmetszet típusa és törésindító konstrukciós megoldások alkalmazása. Ebben a fejezetben bemutatásra kerül egy alakoptimalizációs folyamat, amelyhez véges elemes analízist alkalmaztam, mint kutatási módszer. A kutatás elsődleges célja az volt, hogy alakoptimalizáció segítségével csökkentsem a vékonyfalú szerkezetekre jellemző kezdeti csúcserő értékét, ráadásul úgy, hogy figyelembe vesz a tömegoptimalizáció követelményeit is. Amennyiben csökkenteni tudjuk a szerkezet kezdeti plasztikus deformációjához szükséges zömítési erőt, hamarabb megindulhat a konstrukció energia abszorpciója. Az analízis alapján megfogalmazott következtetéseimet a végeselemes vizsgálatok eredményeire alapoztam, azonban a VEM során használt paraméterezést valós zömítési analízissel validáltam.

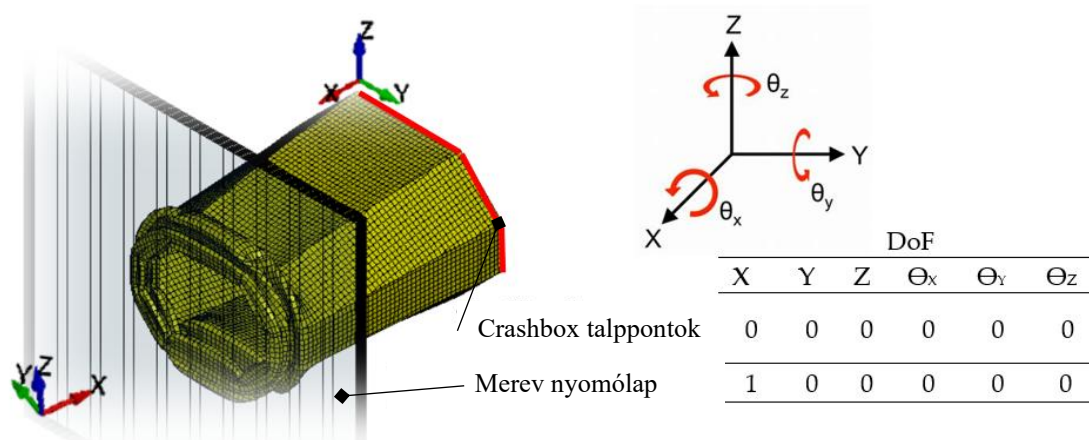
7.1 A vizsgálat tárgya, peremfeltételek

A kutatás tekinthető egy összehasonlító vizsgálatnak, hiszen több különböző, egészen pontosan 12 féle konstrukciót hasonlítottam össze, hogy következtetést tudjak tenni az alkalmazott alakoptimalizáció okozta gyűrődési tulajdonságok megváltozására vonatkozóan. A szimulációk eredményeit különböző szempontok alapján értékeltem, ezek közül a legfontosabbak a kezdeti csúcserő, mint az erő-elmozdulás diagram első lokális maximuma, a crashbox gyűrődése során elnyelt energia, valamint az zömítéshez szükséges erő fluktuációja. Ezen tanulmányban három különböző alapkeresztmetszetet vizsgáltam, amelyeken ugyan azokat az alakoptimalizációkat eszközöltem. Valamennyi változat 2 mm-es falvastagságú vékonyfalú szerkezetként készült, és azonos anyagtulajdonsággal rendelkezett, hogy hiteles összehasonlítást tudjak tenni. Ebben a tanulmányban a crashboxokra vonatkozóan különbséget teszek normál, kúpos, hornyolt és ezek kombinációi között. Ezeket a próbatesteket és jelöléseiket a 14. táblázat mutatja be. A minták Autodesk Inventor CAD szoftverrel készültek, az analízishez pedig LS-Dyna R12.1 végeelem programot használtam. A próbatestekhez használt jelöléseket az angol megnevezések rövidítése adja. A kezdeti erőcsúcsra vonatkozóan 100 kN-os határértéket definiáltam, hiszen ezen érték felett a jármű alvázrészét képező nyúlvány maradó deformációt szenvedne.

14. táblázat A VEM vizsgálatához használt konstrukciók és azok jelölése [KJ121]

Speciális (S)	Speciális-Kúpos (SC)	Speciális-Hornyolt (SN)	Speciális-Kúpos-Hornyolt (SCN)
Nyolcszög (O)	Nyolcszög-Kúpos (OC)	Nyolcszög-Hornyolt (ON)	Nyolcszög-Kúpos-Hornyolt (OCN)
Téglalap (R)	Téglalap-Kúpos (RC)	Téglalap-Hornyolt (RN)	Téglalap-Kúpos-Hornyolt (RCN)

Ahhoz, hogy információt kapjak a keresztmetszet, a kúpos kialakítás és a hornyok hatásáról a crashbox gyűrődési viselkedésére vonatkozóan, végeselemes elemzést végeztem, ahol a próbatesteket merev testtel, állandó terhelés mellett 10 mm/s sebességgel zömítettem miközben rögzítettem a modellek reakcióerőt és az elmozdulások értékeit 100 Hz-es mintavételi frekvencia mellett. Mindegyik próbatest 150 mm-es magasságú, így a 120 mm-es zömítési elmozdulás 80 %-os névleges alakváltozást jelentet. A paraméterezés fontos részét képezte a megfelelő kényszerek megválasztása, ennek eredményeként a crashbox talppontok szabadságfokainak számát nullára csökkentettem. A zömítő lap szabadságfokainak számát X-irányúra redukáltam, így oldalirányú elmozdulása vagy elfordulása a kényszerek miatt nem tudott megvalósulni. A vizsgálat során használt kényszereket a 52. ábra szemlélteti.



52. ábra A vizsgálathoz használt kényszerek [KJ121]

A kutatás során fontos szempont volt a tömegoptimalizáció, ezért az alkalmazott anyag típus egy, a járműiparban is gyakran használt, ötvöztött alumínium, nevezetesen az EN AW 6082, melynek legfontosabb fizikai és mechanikai, a végeselemes analízis szempontjából releváns jellemzőit a 15. táblázat foglalja össze [KJ121].

15. táblázat AlMgMnSi1 alumínium jellemző mechanikai jellemzői [KJ121]

Mechanikai tulajdonság	Jellemző érték
Folyáshatár $R_{p0.2}$ [MPa]	240-260
Szakítószilárdság R_m [MPa]	295-310
Sűrűség [g/cm ³]	2,70
Young's modulus [GPa]	70
Poisson tényező [-]	0,3

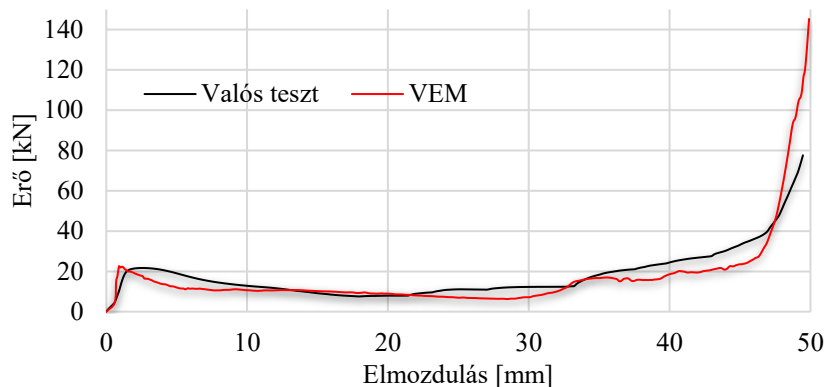
A VEM modelleket az LS Dyna PrePost V.4.7.17 program verzió segítségével paramétereztem és a numerikus vizsgálathoz „Plastic-Kinematics” anyagmodellt használtam, amely alkalmas plasztikus deformáció kezelésére. Ez az anyagmodell (MAT_003) alkalmas erő-elmozdulás görbék megjelenítésére számított modulusokkal, szilárdsággal, nyúlással és Poisson-számmal. Ezeket az értékeket LS-DYNA anyaglejlemzők paraméterezésénél kellett definiálnom a fenti

15. táblázat adatainak figyelembe vételével. Ez a modell alkalmas a kezdeti rugalmassági adatok, mind a plasztikus deformáció kezelésére. A megválasztott anyagmodell és paraméterezési metódus validálása érdekében valós zömítési tesztet végeztem. Tekintettel a vizsgált próbatestek összetettségére, a paraméterezés és az anyagmodell validálásához egy egyszerűsített vékonyfalú szerkezetet alkalmaztam. A kísérleti nyomóvizsgálathoz 2 mm falvastagságú és 30 mm átmérőjű AlMgSi anyagot használtam. Az alumíniumcső anyagjellemzői annak útmutatója szerint 150 MPa folyáshatár, míg a Young-modulus 70 GPa. Gyűrődés indítóként 8 mm átmérőjű furatokat használtam a próbatest palástján. A 53. ábra a numerikus és kísérleti vizsgálathoz használt próbatestek mintáit mutatja a teszt előtt és alatt.



53. ábra A választott anyagmodell és a paraméterezési folyamat validálása [KJ121]

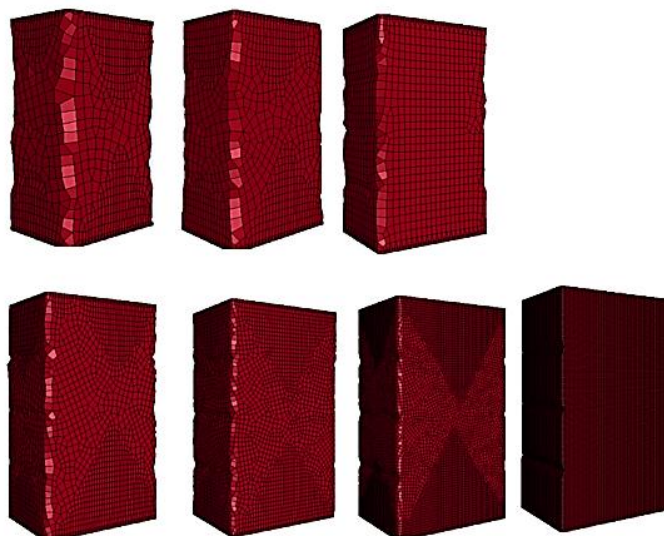
A zömítési sebességet 1 mm/s-ra választottam meg, 40 mm-es deformációs elmozdulás mellett a minta 60 mm-es kezdeti magasságához képest. A vizsgálathoz szükséges erő- és elmozdulási értékek rögzítéséhez az INSTRON 8801 szervohidraulikus anyagfárasztó vizsgálógépet használtam, WaveMatrix adatgyűjtő és elemző szoftverrel. A validálás során kapott erő-elmozdulás diagramok a 54. ábrán figyelhető meg, amely karakterisztikák igazolják az alkalmazott „MAT_003 Plastic-Kinematics” anyagmodell és paraméterezés összehasonlítás célzatú megfelelőségét. A validálás céljából alkalmazott zömítő tesztet három próbatesten ismételtam, így fontos megjegyezni, hogy a valós teszthez tartozó érték, az a háromszor ismételt mérés átlagát jelöli.



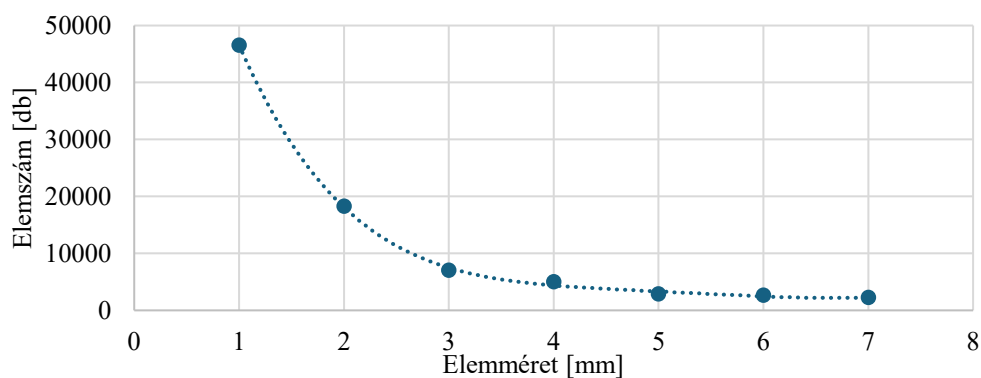
54. ábra A validálás során kapott eredmények [KJ121]

7.2 Hálósűrűség, konvergencia vizsgálat

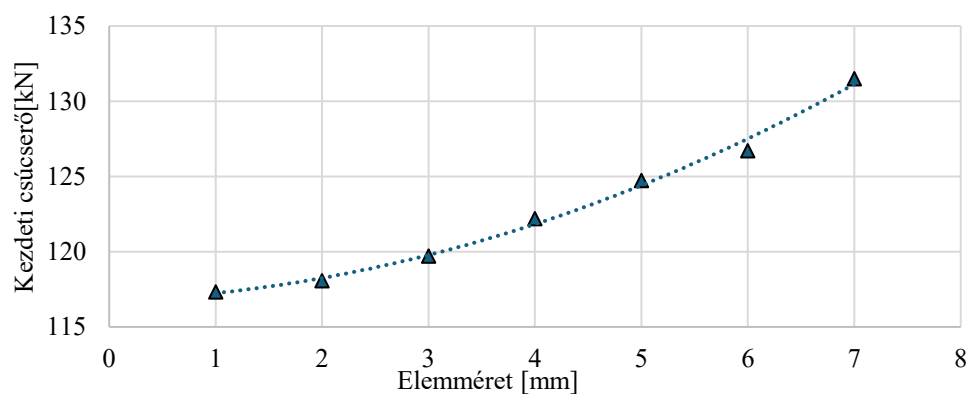
Az eredményeim hitelességének igazolása érdekében a vizsgálatot megelőzően hálósűrűség konvergencia analízist végeztem, hogy az elemzés majdani eredményeit ne befolyásolja az elemek méretének módosítása. Ez magában foglalja a modell elemeinek számának növelését, és annak megfigyelését, hogyan változnak az eredmények, amíg megismételhető megoldáshoz nem konvergálnak. Ez fontos a pontos eredmények eléréséhez, miközben egyensúlyba hozza a VEM modell méretét és megoldási idejét. Természetesen a növelt elemszámmal pontosabb numerikus eredményekhez juthatunk, azonban ez magával vonja jelentős futtatási és számítási időt. A hálókongvergencia analízis során egy dedikált eltérést kell kiválasztani százalékban megadva. Ha az elemméret-csökkentés a számítási eredményekre vonatkozóan 1 %-nál kisebb eltérést eredményez, a hálósűrűség elfogadható. Ez az a határ, ahol a megoldási idő és az eredmények pontossága egyensúlyban van. Az első csúcserőértékeket használtam a hálókongvergencia kritériumaként, a relatív hibaértékeket számítottam a maximális erőértékek között, és konvergencia vizsgálatot megfelelőnek tekintettem, ha az eredmények közötti eltérés kevesebb volt, mint 1 %. A hálókongvergencia analízishez az RN (Téglalap-Hornyolt) típusú próbadarabot használtam. Az elemzés 7, 6, 5, 4, 3, 2 és 1 mm-es elemméretre vonatkozó vizsgálatot tartalmazott, amelynek az elemszámra való hatását a 55. ábra mutat be. A konvergenciaanalízis eredményeit pedig a 56. és 57. ábra mutatja be. A konvergencia vizsgálat alapján 2 mm-es elem méretet választottam az összehasonlító elemzéshez, hiszen ez kellő pontosságot eredményez viszonylag rövid (90-120 perc) számítási idő mellett.



55. ábra A konvergencia analízishez használt modell és a különböző hálósűrűségek [KJ121]



56. ábra Az elem méret hatása az elem darabszámba [KJ121]

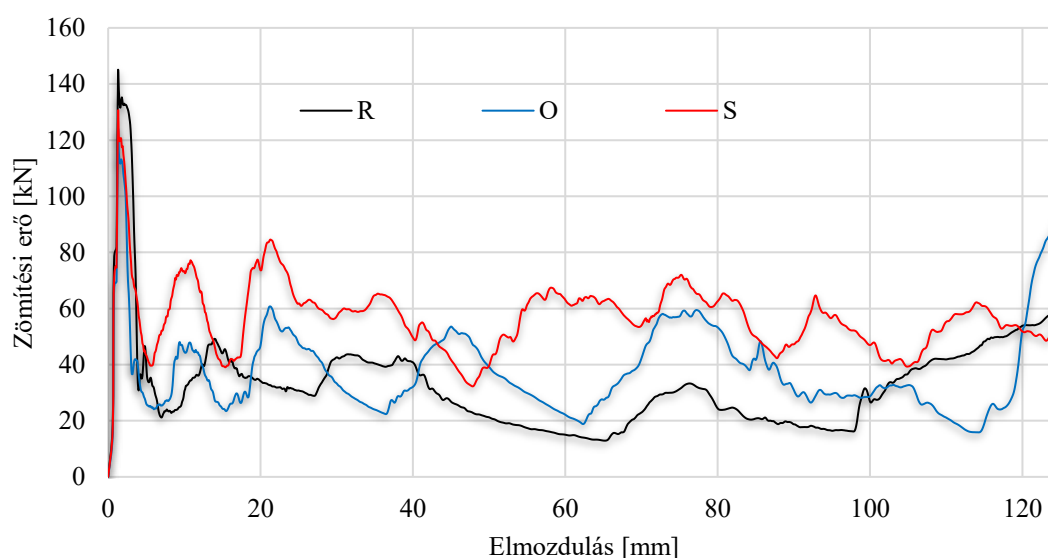


57. ábra A konvergencia analízis eredménye a kezdeti csúcserő tekintetében [KJ121]

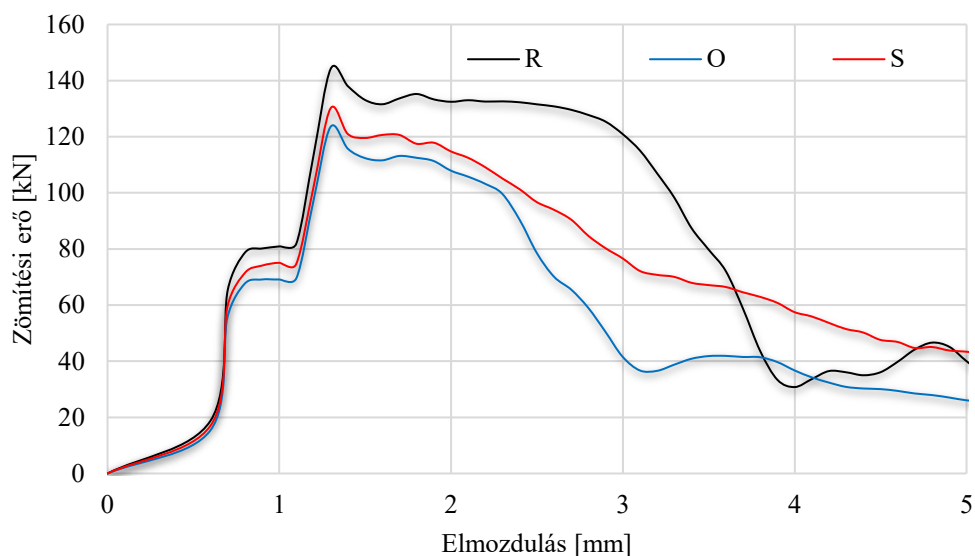
7.3 Keresztmetszet típusának hatása a gyűrődési értékekre

Az 58. és 59. ábra az első összehasonlító teszt eredményeit mutatja, ahol a kiegészítők nélküli alap konstrukciók (S, O, R) kerültek összehasonlításra. A téglalap keresztmetszetű próbatest (R) esetében 144,3 kN, a nyolcszög változatnál (O) 123,5 kN, míg a speciális (S)

típusnál 130.2 kN erő eléréséhez volt szükség, hogy a plasztikus deformáció megjelenjen. Ezek alapján látható, hogy ugyan a nyolcszög változat tűnt a legeredményesebbnek, azonban még ez is jelentősen meghaladta a 100 kN-os terhelési határt. A keresztartó megelőzése érdekében azonban egyikük sem hagyhatta figyelmen kívül az erőkorláttal kapcsolatos követelményeket. Az első erőcsúcs után jól látható a plasztikus deformációs folyamat, hiszen a következő tartományban jelentős erő fluktuáció figyelhető meg a konstrukció rétegenkénti deformációja miatt. A diagramgörbék összehasonlításával jól látható, hogy az elnyelt energia mennyisége javítható több élletörés, lekerekítés vagy bonyolultabb belső keresztmetszet használatával. Figyelembe véve a téglalap alakú változat nagy erőcsúcsát és alacsony zömítési erő szükségletét, nem a legjobb módja annak, hogy így önmagában crashbox szerkezetként alkalmazzuk. A teszt eredményeit a 16. táblázatban gyűjtöttem össze, amelyek segíthetnek feltárni az egyes görbék közötti eltérést. Az elemzéshez a kezdeti csúcserőt (P_{max}), az plasztikus deformációhoz tartozó zömítési erő középértékét (MCF), a szórás (STDEV) és relatív szórás (RSD) értékét.

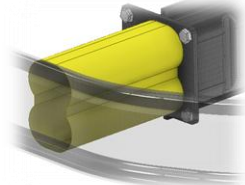
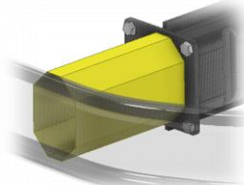
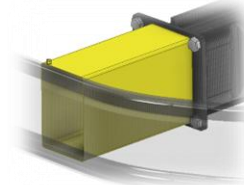


58. ábra A három alap szelvénytípus gyűrődési karakterisztikája [KJ121]



59. ábra A kezdeti csúcserő alakulása a szelvény típusok függvényében [KJ121]

16. táblázat Az egyes keresztmetszet típusokhoz tartozó gyűrődési jellemzők [KJ121]

	Keresztmetszet típusai			
	Speciális (S)	Nyolcszög (O)	Téglalap (R)	
				
$F_{\max}$	130,17	123,46	144,26	[kN]
MCF	57,43	37,41	27,17	[kN]
STDEV	11,14	11,1	9,42	[kN]
RSD	34,44	29,62	34,44	[%]

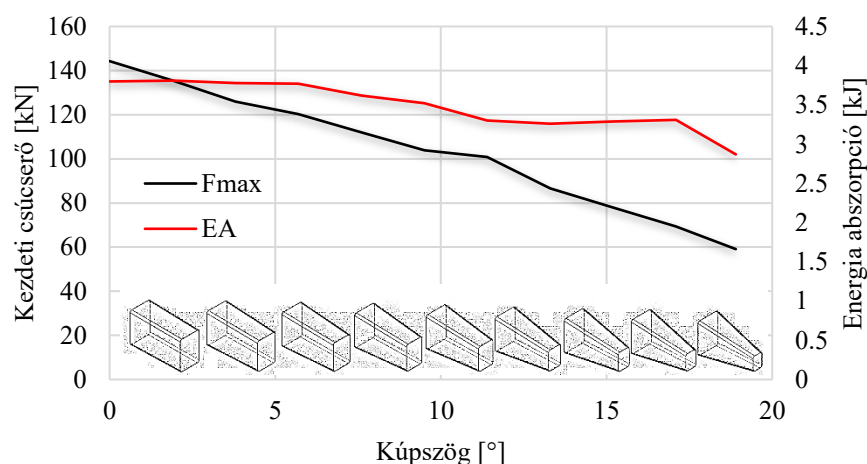
7.4 Kúpos kialakítás hatása

Az előző fejeztem ismertetett eredmények azt igazolták, hogy a vizsgálat tárgyát képező alap konstrukciók önmagukban nem tekinthetők megfelelő abszorbereknek, hiszen mind a három változat kezdeti csúcserő értéke meghaladta az 100 kN-os határértéket, amely valós ütközési körülmények között már a nyúlványok maradó deformációját is eredményezhetik. Ebben a fejezetben bemutatom, hogy milyen hatása van egy kúpszög alkalmazásának a csúcserő alakulására és az energia abszorpciós képességre. A kúpszög a két végpont közötti keresztmetszet különbségét fejezi ki a hossz függvényében. Elsőként meg kellett határoznom a konstrukciós kúpszög értékét ezért iterációs eljárással két fokonként csökkentettem a gyakorlatban is gyakran alkalmazott téglalap keresztmetszetű (R) crashbox kúpszögét, és vizsgáltam, hogy mikor éri el az adott crashbox a 100 kN-os $F_{\max}$ küszöbértéket. Ennek az iterációs folyamatnak az eredményeit a 17. táblázatban és 60. ábrán foglaltam össze, ahol

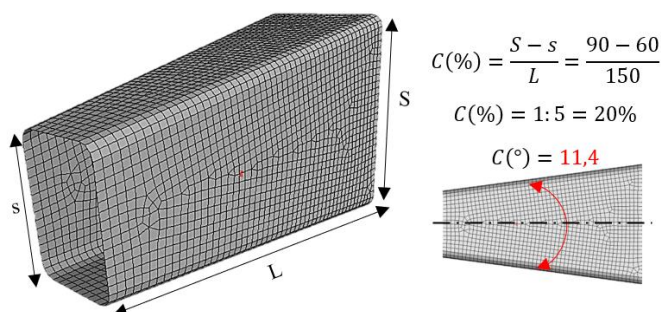
rögzíttem a szerkezet ütközési energia elnyelő képességét is, hiszen azt feltételeztem, hogy a kúpszög a energia abszorpciós képességét is csökkenteni fogja a szerkezetnek. A vizsgálat alapján megállapítható volt, hogy a 20%-os (11,4) kúpszög az a határ amikor elérjük a kívánt küszöbértéket a csúcserő tekintetében. Ez konstrukciós méreteket tekintve a téglalap keresztmetszetű (R) változat esetében egy 90 mm x 60 mm-es és egy 60 mm x 40 mm-es keresztmetszetet jelent a crashbox két végén. Az analízishez használt kúpszög értelmezését a 61. ábra segíti.

17. táblázat A kúpszög iteráció eredményei

											
Kúpszög	0°	1,9°	3,8°	5,7°	7,6°	9,5°	11,4°	13,3°	15,2°	17,1	18,9
	0%	3,33%	6,66%	10%	13,33%	16,66%	20%	23,33%	26,66%	30%	33,33%
F _{max} [kN]	144,3	135,5	126,0	120,2	112,1	103,9	100,8	86,6	77,9	69,3	59,1
EA [kJ]	3,8	3,81	3,78	3,77	3,62	3,52	3,1	3,26	3,29	3,31	2,87



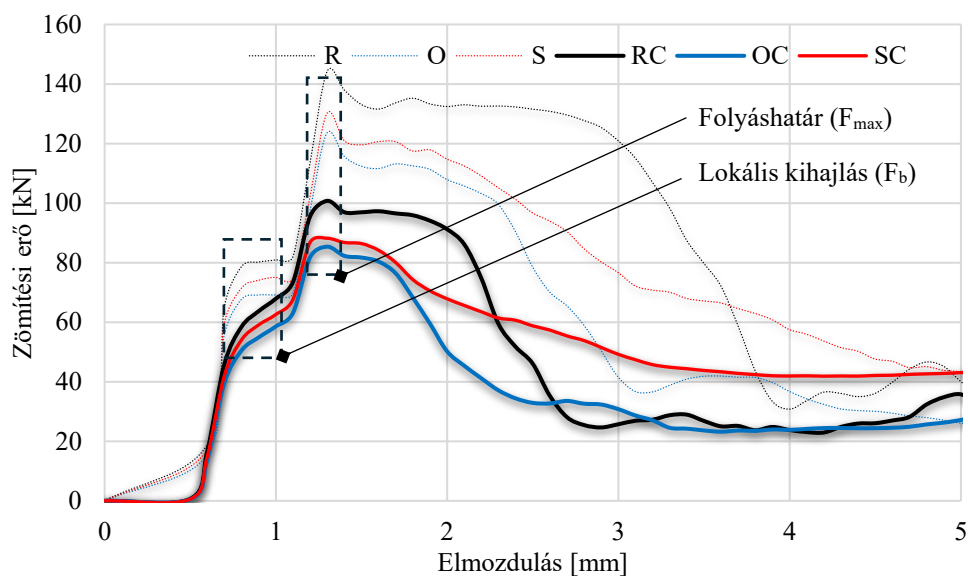
60. ábra Az F_{max} és EA értékek függése a próbatest kúpszögétől



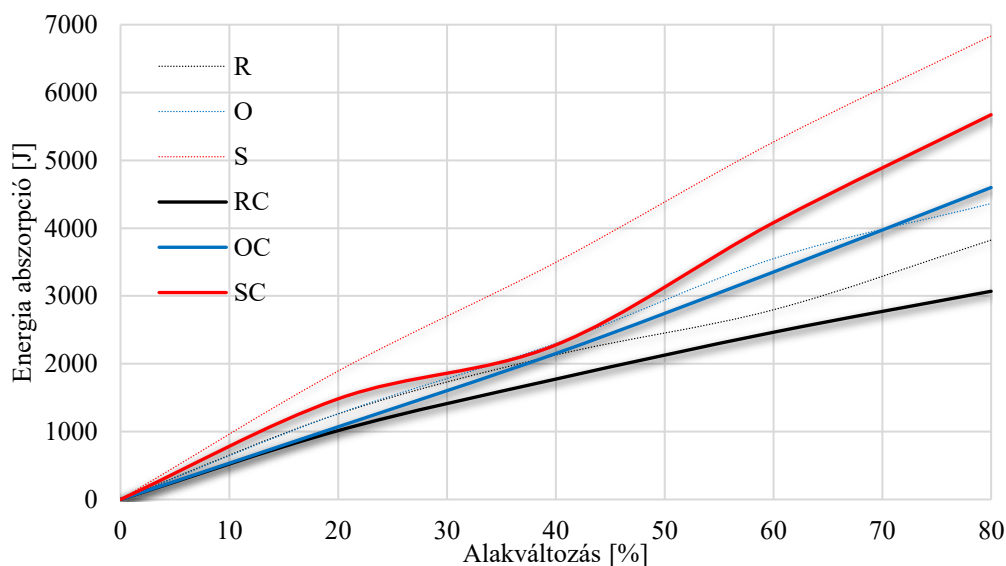
61. ábra Az optimalizációhoz használt kúpszög értelmezése

A 60. ábra alapján megállapítható, hogy lineáris összefüggés áll fenn a crashbox szerkezeti merevsége és a kúpszög értéke között. Az is igazolhatóvá vált, hogy a kúpszög hatása jobban érvényesül a kezdeti csúcserő értékére vonatkozóan, mint az energia abszorpció értékére, hiszen

a két karakterisztika eltérő meredekséget mutat. A fent említett $11,4^\circ$ -os szöget vesszük alapul, a crashbox a csúcserő 31 %-al csökkent, miközben az elnyelt zömítési energia értéke csak 19%-al csökkent. Az egyes szelvény típusoknál alkalmazott kúpszög pozitív hatásának szemléltetéséhez a normál és az optimalizált próbatestek görbéit hasonlítottam össze, amelyet a 62. ábrán mutatok be, ahol a vastag vonalak a kúpos típushoz tartoznak. A keresztmetszet formájától függetlenül, kúpos alakot alkalmazva jelentősen optimalizálható volt a crashbox első csúcsterhelése. A gyűrődési karakterisztikákban nincs jelentős eltérés az alap típusokéhoz viszonyítva, hiszen mindegyik típus és annak kúpos változata közel párhuzamos. A speciális (S) forma esetén a csúcsterhelés 32 %-kal csökkent és elérte a 88 kN-t. A nyolcszögletű és a téglalap változatok eredményeit elemezve a tendencia megegyezett, hiszen az előbbinél 30,89 %-os csökkenés, míg a téglalap változatnál pedig a 30 61%-kal javult a kezdeti csúcserő, számszerűen 85,36 kN, illetve 100,74 kN. A maximálisan megengedett 100 kN erő limitre hivatkozva a téglalap alakú próbatest még kúpos optimalizálással sem felel meg a követelménynek. A kezdeti lokális kihajlás mindhárom típusnál jól megfigyelhető volt, de immáron sokkal enyhébb lefutással. Amikor a terhelés elér egy bizonyos (P_b) pontot először kihajlás a szerkezet leggyengébb síkjában jelenik meg, amely még reverzibilis. Ezt helyi vagy lokális kihajlásnak nevezik. A lokális kihajlás hatására, a többi lemez egymás után kihajlik, egy úgynevezett kihajlási hullámot eredményezve ezzel, és hirtelen eléri az F_{max} értéket. A zömítési teszt eredményei egyértelműen igazolták a kúpos alak pozitív hatását a crashbox konstrukciók kezdeti csúcserő értékükre vonatkozóan. Azonban fontos azt is megvizsgálni, hogy milyen hatással van a gyűrődést segítő formai kialakítóknak, jelen esetben a kúpszögnek a gyűrődő elemek energia abszorpciós képességére. A 63. ábra az elnyelt energia értékét mutatja Joule mértékegységben. A három szelvény típus eltérően viselkedett, hiszen a speciális (S) és téglalap (R) változat energia abszorpciós képessége rendre 17 és 20 %-al csökkent, miközben a nyolcszög (O) változatnál a kúposság 5 %-al még növelte is a energia elnyelő képességet. Ezek alapján kijelenthető, hogy a kúpszög nem csak a csúcserő csökkentésére alkalmazható konstrukciós megoldás, hanem az abszorpciós képességre is pozitív hatással tud lenni, viszont fontos figyelembe venni az adott szerkezet keresztmetszetét.



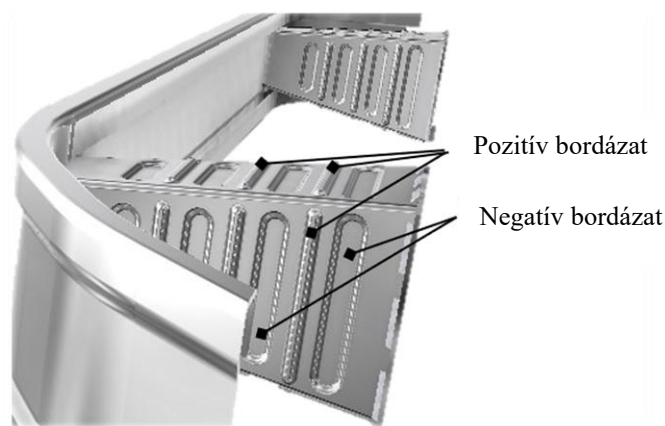
62. ábra A kúpszög kezdeti csúcserőre való hatása [KJ121]



63. ábra Energia abszorpció az elmozdulás függvényében [KJ121]

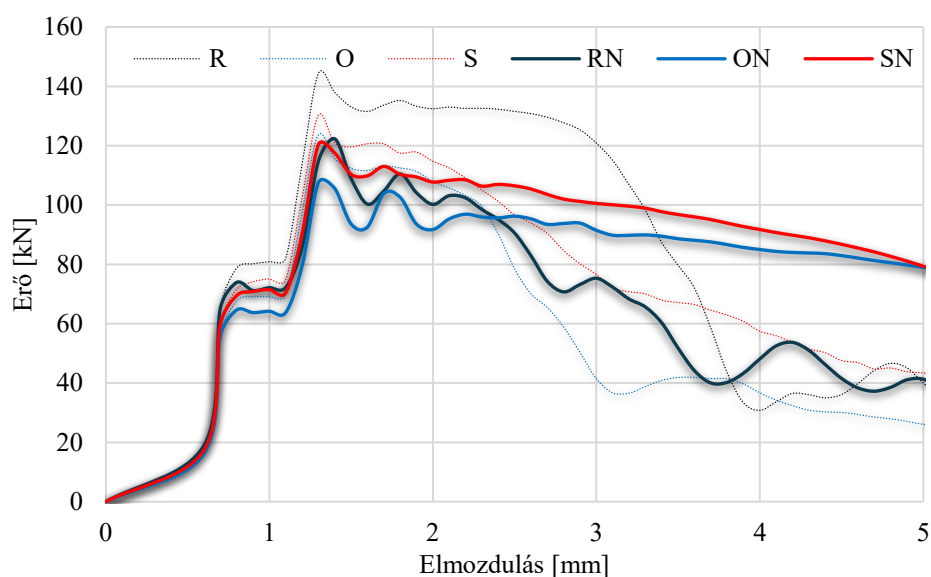
7.5 Bordázat hatása a gyűrődési jellemzőkre

A hornyok olyan geometriai gyűrődést indító konstrukciós megoldások a szerkezet palástja mentén, melyeknek elsődleges célja, hogy elősegítsék a szerkezet plasztikus deformációjának kezdetét, és ezáltal az energia abszorpciót, mindazonáltal csökkentsék a zömítéshez szükséges erő ingadozását gyűrődésük során. Valamennyi próbatest három azonos mélységű bordázattal lett optimalizálva, a szerkezetek palástján, azonos helyen. A plasztikus deformáció kialakulását segítő bordázatok konstrukciós kialakítása alapján pozitív és negatív változatokat különböztethetünk el, ezek értelmezését segíti a 64. ábra. Jelen analízis azonban csak a negatív bordázatok hatásait vizsgálja.



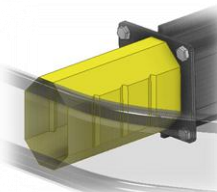
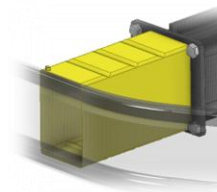
64. ábra A pozitív és negatív gyűrődést segítő bordázat értelmezése [KJ121]

Ahhoz, hogy informatív adatokat kapjak a bordázatok paláston való alkalmazásainak hatásáról, az eredményeket ismét a normál változatokkal hasonlítottam össze. Ezt az összehasonlítást a 65. ábra mutatja be, ahol a vastag vonalak szintén az optimalizált, vagyis a bordázott változatok eredményeit mutatják. A negatív irányú bordázat alkalmazásával a kezdeti csúcserő probléma mérsékelhető, azonban ennek hatása enyhébb, mint a kúpszöggel optimalizált változatoké, viszont átlagosan 10-15 %-kal így is jobb érték érhető el velük az alap (S, O, R) konstrukciókhoz képest. Az első 10 mm-es elmozdulásban a speciális (S) és a nyolcszögletű (O) konstrukciók bordázott változatainak (SN, ON) zömítési karakterisztikája nagyon hasonlóan alakultak. A kúpos megoldáshoz képest ezek a bordázott változatok meghaladták a megengedett 100 kN-os csúcserő határértéket. Ráadásul ezek a bordázott változatok a keresztmetszet típusától függetlenül lényegesen alacsonyabb energiaelnyelő teljesítményt mutattak. A 100 mm-es elmozdulás felett (80 %-os deformáció) minden konstrukciónál megindult egy felkeményedési fázis és több verzió ismét megközelíti a megengedett 100 kN határt. A bordázott konstrukciókra vonatkozó zömítési teszt főbb eredményeit a 18. táblázatban foglaltam össze.



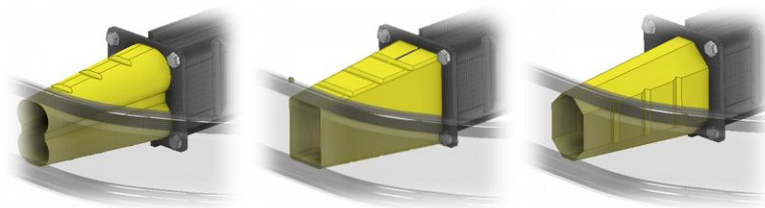
65. ábra Gyűrődést segítő bordázatok hatása a kezdeti csúcserőre [KJ121]

18. táblázat A bordázat hatása a gyűrődési jellemzőkre

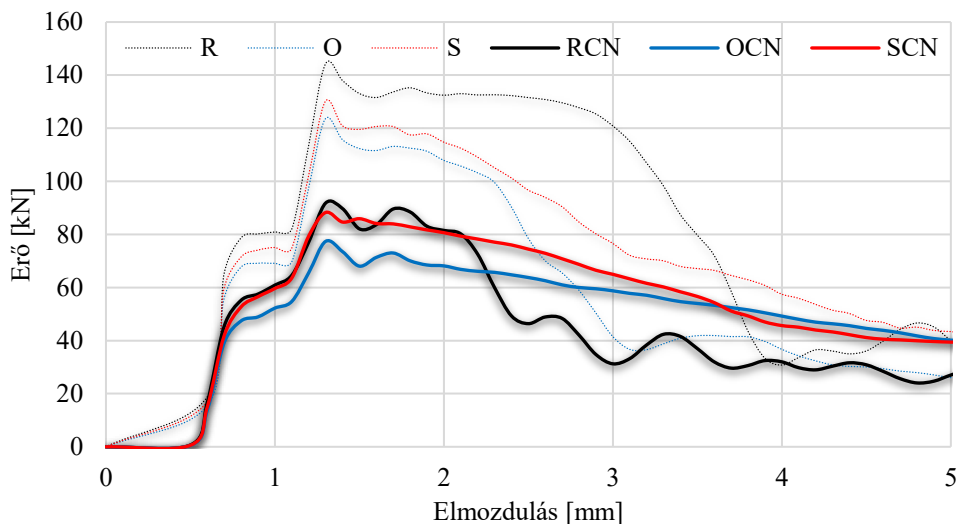
Keresztmetszet típusai				
	Speciális-Bordázott (SN)	Nyolcszög-Bordázott (ON)	Téglalap-Bordázott (RN)	
				
$F_{\max}$	120,34	107,57	122,31	[kN]
STDEV	12,23	13,22	10,81	[kN]
RSD	39,1	17,14	33,14	[%]
AE	4,07	5,14	4,41	[kJ]

7.6 Bordázat és kúpszög együttes alkalmazása

A következőkben az előző két változat kombinációját vagyis a kúpszög és a gyűrődést segítő bordázat együttes alkalmazását (RCN, OCN, SCN) kívánom bemutatni. Az ezzel kapcsolatos előzetes feltételezésem az volt, hogy a kúpszög alkalmazása és a palástmentén kialakított bordázat együttes jelenléte hatékonyabb lesz a csúcserő alakulásának tekintetében, mint a két alkalmazás bármelyike külön-külön. Természetesen a kúpszög alkalmazása azt jelentette, hogy helyhiány miatt csak rövidebb bordákat tudtam alkalmazni. Ebben a fejezetben a 66. ábra mutatja a vizsgált kialakításokat, a 67. ábra pedig a zömítővizsgálatok eredményeit.

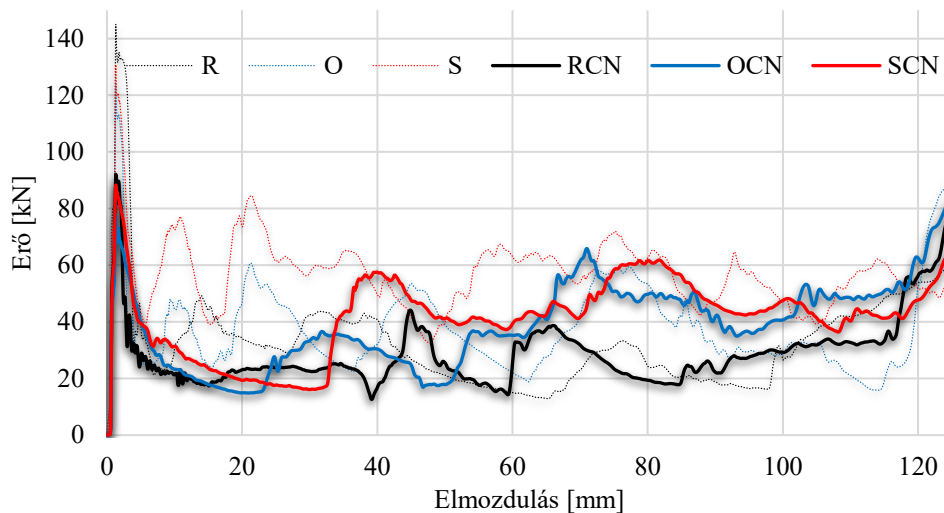


66. ábra Kúpossággal és gyűrődést segítő bordákkal optimalizált próbatestek [KJ121]



67. ábra A kúpszög és a gyűrődést segítő bordázat együttes hatása a kezdeti csúcserő értékére [KJ121]

A törésindító bordák és a kúpszög egyidejű alkalmazása, igazolta a kezdeti feltételezésemet, hiszen jelentősen csökkentette a plasztikus deformáció megjelenéséhez szükséges zömítő erő mértékét, hiszen az alap konstrukciókhoz (S, O, R) képest átlagosan 35 % -os javulást sikerült elérni. Téglalap (R) alap és annak duplán optimalizált változatát (RCN) összehasonlítva a javulás 36,8 % volt a kezdeti csúcserő tekintetében. A nyolcszögletű (O) crashbox koncepció csúcserő értékét 37,33 %-al sikerült csökkenteni bordázat és a kúpszög együttes (OCN) segítségével, számszerűen 77,37 kN zömítő erőnél jelent meg maradó deformáció a gyűrődés során. Az SCN típusnál is 32,1 %-os javulást értem el, vagyis 88,26 kN zömítő erőre sikerült csökkenteni a plasztikus deformáció kezdetét. Az ideális abszorber a lineárisan rugalmas kezdeti szakaszt követően közel állandó feszültség érték mellett zömülnek, ami a fémhabokra is jellemző plató szakaszt eredményez a gyűrődési karakterisztikában. A szimuláció során kapott eredmények alapján azonban kijelenthető, hogy sem a kúpszög sem a bordázat, sem azok együttes alkalmazása nem elegendő, hogy az zömítési erő fluktuációját jelentős mértékben mérsékelni tudjuk, hiszen azok együttes alkalmazása esetén is 30,9 % volt az átlagos relatív szórás és 24,5 % az ULC értéke. A 68. ábra a kombinált optimalizáció eredményeit mutatja.



68. ábra A kúpszög és gyűrődést segítő bordázat együttes hatása a gyűrődési karakterisztikára [KJ121]

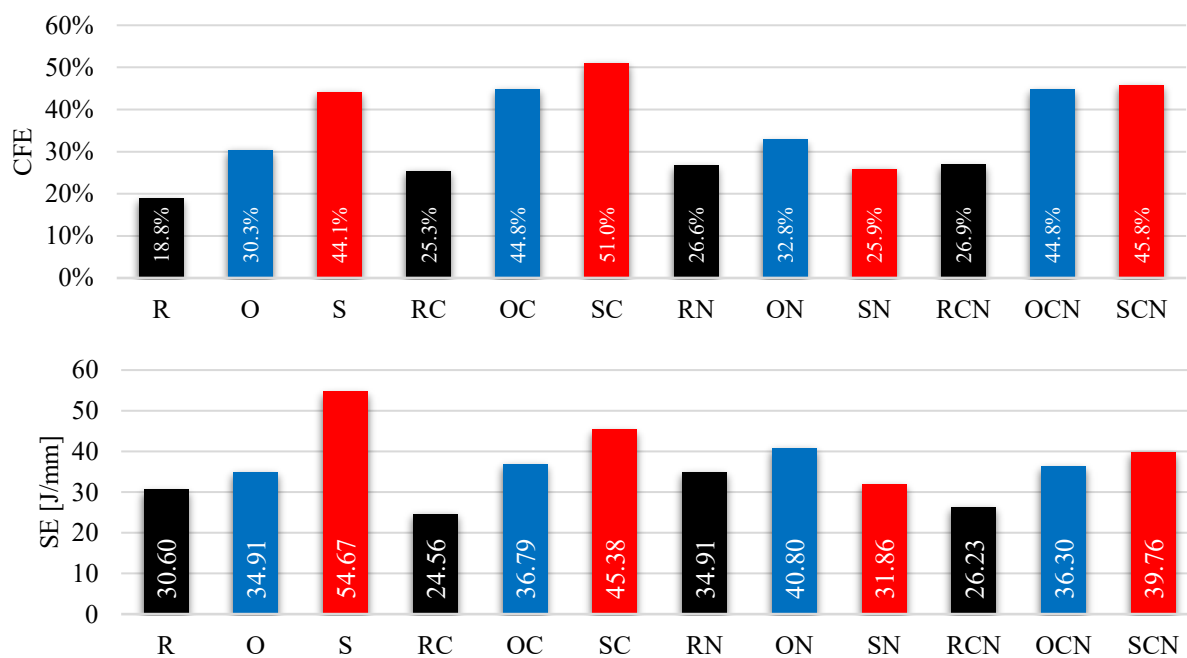
7.7 Konstrukciós hatékonyság meghatározása SEA, CFE és SE értékekkel

A korábbi fejezetekben is használt SEA érték, lehetőséget ad arra, hogy a tömeg és térfogat optimalizáció követelményét is figyelembe vegyem, hiszen ezzel kifejezhetem az egységnyi térfogatra és egységnyi tömegre jutó elnyelt energia mértékét. Az egységnyi térfogatra vetített abszorpciós hányad értelmezésekor azonban kétféle térfogatra vonatkoztatott definíciót kell elkülöníteni. Az egyik a konstrukciós térfogat a másik pedig a működő térfogat. A konstrukciós térfogat esetén a crashbox szerkezetet tömör testnek tekintem, vagyis ezzel meghatározható, a tényleges beépítési helyigénye, befoglaló mérete. A működő térfogatot a crashbox falvastagságán számított térfogatként értelmezendő, vagyis az energia abszorpcióban ténylegesen részt vevő térfogat, vagyis a crashbox vékonyfalú szerkezetként értelmezhető ebben az esetben. A konstrukciós és működő térfogatra vonatkozó definíció elkülönítését azért tartom fontosnak, ahogy korábban említettem léteznek fémhabbal, kompozittal vagy valamilyen egyéb abszorberrel töltött crashbox szerkezetek, melyeknél a konstrukciós és a működő térfogat megegyezik, ezáltal másként értelmezendő a térfogati egységre jutó energia abszorpció értéke is. A végeelem szimulációban vizsgált konstrukciók vékonyfalú szerkezetként értelmezendő szerkezetek, ezért ebben az esetben a falvastagságon számított térfogatra számított energia mennyiséget számítottam ki. A számítások alapján az SC jelölésű (Speciális-Kúpos) koncepció elégti ki leginkább a tömeg és térfogatoptimalizáció követelményét, hiszen 34 J/g egységnyi tömegre és 93 J/cm^3 egységnyi működő térfogatra vonatkoztatott energia abszorpciót mutat. Amennyiben az alakoptimalizáció célja a csúcserő csökkentése és az energia abszorpciós teljesítmény megtartása vagy növelése, célszerű olyan mutatószámokkal végezni a kiértékelést, amely mindkét paramétert figyelembe veszi. Ilyen

mutatószám a CFE, amely a kezdeti csúcserő és a plasztikus deformációhoz szükséges zömítő erő középértékének arányát fejezi ki százalékos értékben. Az SE értékével pedig kifejezhető, hogy milyen mértékű hosszváltozást okozott egy adott energia abszorpció a szerkezet hosszában. Mivel az analízisben, minden konstrukciót azonos zömítési elmozdulással terheltem (120 mm), a zömítési görbék integráltjával pedig megállapítható az elnyelt energia mennyisége, így könnyen meghatározható az egységnyi deformációra jutó energia értéke J/mm mértékegységben. A SEA, CFE és SE értékeket a 19. táblázat és 69. ábra teszi összehasonlíthatóvá.

19. táblázat Egységnyi térfogatra és tömegre vonatkoztatott energia abszorpció [KJ121]

	Konstrukciós változatok				
	S	SC	SN	SCN	ME
Tömeg	219	174,1	220,2	186,9	g
Térfogat	81,2	64,5	81,6	69,2	cm ³
SAE _{tömeg}	32	34	18	28	J/g
SAE _{térfogat}	86	93	50	75	J/cm ³
	O	OC	ON	OCN	
Tömeg	205	174	206	175	cm ³
Térfogat	75,9	64,4	76,3	64,8	g
SAE _{tömeg}	23	28	27	28	J/g
SAE _{térfogat}	62	76	72	75	J/cm ³
	R	RC	RN	RCN	
Tömeg	238	202	240	203	g
Térfogat	88,1	74,8	88,9	75,2	cm ³
SAE _{tömeg}	17	16	19	18	J/g
SAE _{térfogat}	46	43	52	47	J/cm ³



69. ábra A konstrukciók CFE és SE értékei

7.8 A vizsgálat alapján tett következtetések

A végeelemes analízis lehetőséget adott arra, hogy megvizsgáljam azokat a konstrukciós optimalizációkat, amelyekkel befolyásolhatjuk a crashbox szerkezetek gyűrődési jellemzőit, köztük a plasztikus deformációhoz szükséges zömítő erő értékét, és az elnyelt energia mennyiségét. A három alap konstrukcióra vonatkozóan azt a megállapítást tettem, hogy bár a komplexebb keresztmetszet nagyobb energia abszorpciós képességet jelenthet, ha a tömeg és térfogatoptimalizációkat is figyelembe vesszük, viszont negatív hatása van a kezdeti csúcserő értékére. Mivel a kezdeti csúcserő határozza meg, hogy az ütközés esetén mikor indul meg a mozgási energia abszorpciója plasztikus deformáció segítségével, ezért fontos annak értékének csökkentése. Más szempontból a crashbox szerkezetek merevségének kisebbnek kell lenni, mint az alváz részét képező nyűlvány merevsége, hiszen ellenkező esetben az ütközési energia a jármű szerkezetében okozna deformációt, ez viszont 16 km/h ütközési sebesség alatt nem megengedett. Ahhoz, hogy a gyűrődésindító konstrukciós megoldások hatását tudjam vizsgálni szükség volt egy kezdeti csúcserő felső korlátjának meghatározása, amely ebben a vizsgálatban 100 kN volt. Ez azt jelenti, hogy ha bármely konstrukció maradó deformációjának megjelenéséhez több zömítési erőre van szükség, mint a meghatározott 100 kN-os érték, az nem felel meg az elvárásoknak. Ezért kúpossággal és a crashbox koncepciók palástján alkalmazott negatív bordázatot alkalmaztam, mint törésindító konstrukciós megoldások. Alkalmazásukkal jelentősen, mint egy átlagosan 30 %-al csökkenthető a kezdeti csúcserő értéke, így az ütközési energia abszorpció hamarabb indulhat meg. A kezdeti csúcserőnek való megfelelés elsődleges követelmény volt az elemzés során. Másodlagos értékelési szempontnak az energia abszorpciós értékeket választottam, majd ennek a hatékonyságra és tömegoptimalizációra vonatkozó mérőszámait, mint a SEA, CFE és SE. Fontos a gyűrődés során a szerkezet alakváltozási stabilitással szembeni követelménye is, amelynek összehasonlítására a szórás, relatív szórás és ULC értékeket használtam. A 20. táblázatban összefoglaltam a szimulációs vizsgálat összes követelményét, ahol kiemeléssel jelöltem, hogy az adott értékelési szempontnak melyik konstrukció felel meg a leginkább. Ezt követően, hogy ezek alapján ki tudjam választani a legideálisabb konstrukciót a követelmények fontosságának megfelelően pontozási rendszert állítottam fel. Mivel a kezdeti csúcserőnek való megfelelés alap követelmény, ezért csak azokat a konstrukciókat pontoztam, amelyek F_{max} értéke nem haladta meg a 100 kN-os küszöbértéket. Ezeket pedig a 21. számú táblázatban gyűjtöttem össze, ahol a súlyozás segítette kiválasztani a követelményeimnek leginkább megfelelőt.

20. táblázat A vizsgálat eredményei

	R	O	S	RC	OC	SC	RN	ON	SN	RCN	OCN	SCN	ME
Fmax	144,3	123,2	130,7	100,8	85,4	88,2	122,3	107,6	120,3	91,8	77,4	88,3	kN
AE	3,8	4,4	6,8	3,10	4,6	5,7	4,4	5,1	4,0	3,3	4,5	5,0	kJ
SEA _m	17	23	32	16	28	34	19	27	18	18	28	28	J/g
SEA _v	46	62	86	43	76	93	52	72	50	47	75	75	J/cm ³
CFE	18,8	30,3	44,1	25,3	44,8	51,0	29,5	26,6	25,9	26,9	44,8	45,8	%
SE	30,6	34,9	54,7	24,6	36,8	45,4	34,9	40,8	31,9	26,2	36,3	39,8	J/mm
ULC	29,8	25,8	14,5	24,4	17,7	33,9	28,1	28,1	35,4	18,7	28,4	26,3	%
STDEV	9,4	11,1	10,4	7,4	8,3	16,9	10,8	13,2	12,2	6,0	12,3	13,3	kN
RSD	34,4	29,6	18,1	29,1	21,8	37,6	33,1	17,1	39,1	24,1	35,6	33,0	%

21. táblázat A kezdeti csúcserő követelményének megfelelő konstrukciók pontozása

		OC	SC	RCN	OCN	SCN	ME	Súlyozás
Primer követelmény	Fmax							
	<100kN	85,4	88,2	91,8	77,4	88,3	kN	5
Szekunder követelmény	AE	4,6	5,7	3,3	4,5	5,0	kJ	3
	SEA _m	28	34	18	28	28	J/g	2
	SEA _v	76	93	47	75	75	J/cm ³	1
	CFE	44,8	51,0	26,9	44,8	45,8	%	1
	SE	36,8	45,4	26,2	36,3	39,8	J/mm	1
Egyéb követelmény	ULC	17,7	33,9	18,7	28,4	26,3	%	2
	STDEV	8,3	16,9	6,0	12,3	13,3	kN	1
	RSD	21,8	37,6	24,1	35,6	33,0	%	1
Pontszám		2	8	1	5	0	0	

A vizsgálat igazolta, hogy a kúpszög és gyűrődést segítő bordázatok külön-külön vagy együttes alkalmazása megoldást jelent a csúcserő problémára, azonban az alakváltozási stabilitásra való hatása keresztmetszet függő. A 21. táblázat pontozása alapján a SC jelölésű konstrukció rendelkezik a legideálisabb gyűrődési jellemzőkkel a vizsgált koncepciók közül. Az eredeti változatához (S) képest 32 %-al tudtam csökkenteni a kezdeti csúcserő értékét a 20 %-os kúpszög alkalmazásával, miközben energia abszorpciója 120 mm-es zömítési löketnél 5,7 kJ volt, ami 45,4 J/mm SE értéket jelent. A tömegoptimalizáció szempontjából is kiemelkedő a többi koncepcióhoz képest, hiszen 34 J/g és 93 J/cm³ SEA értékekkel jellemezhető, gyűrődési hatékonysága pedig 51 %. Természetesen a súlyozás jelen esetben egy közlekedésbiztonság központú szubjektív követelményen alapul. A gyárthatósági szempontokat is figyelembe véve

természetesen a téglalap (T) és nyolcszögletű (O) változatok előnyösebb kivitelek, ezért a vizsgálat alapján megfogalmazott tézisemet ezekre vonatkozóan fogalmaztam meg.

7.9 Tézis

1. tétel: Végelelemes-analízissel igazoltam, hogy az EN AW 6082 AlSi1MgMn alumínium ötvözetből készített téglalap és nyolcszög keresztmetszetű crashbox szerkezetek plasztikus deformációjához (kezdeti csúcserő) szükséges zömítő erő mértéke 35 %-al csökkenthető 20 %-os kúpszög alkalmazásával, és a paláston alkalmazott három darab törésindító, negatív típusú bordázat használatával. Ezzel az alakoptimalizációval egy hagyományos, a gyakorlatban gyakran is alkalmazott téglalap keresztmetszetű crashbox gyűrődési hatásfoka (CFE) 43 %-al, míg a nyolcszögletű koncepció CFE-értéke 36 %-al növelhető, miközben a tömegoptimalizáció szempontjából fontos, egységnyi térfogatra és egységnyi tömegre vonatkoztatott elnyelt energia értéke is javul. [KJ121], [KJ122]

2. tétel: Iterációs módszerrel meghatároztam, hogy az EN AW 6082 AlSi1MgMn alumínium ötvözetből készített crashbox-ok zömítési vizsgálattal meghatározott szerkezeti merevségi értéke és a próbatesten alkalmazott gyűrődést segítő kúpszög értéke között lineáris összefüggés áll fenn. [KJ121]

8. Alacsony ütközésssebességre optimalizált crashbox szerkezet

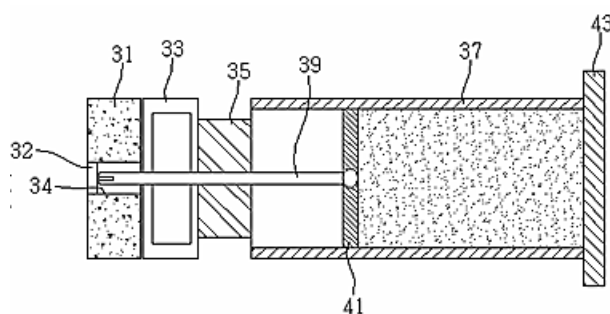
Ebben a fejezetben, egy általam fejlesztett, alacsony ütközési sebességre optimalizált crashbox szerkezet felépítését és működését mutatom be. A fejlesztés alapját a fent részletezett vizsgálatok összessége adta, és P2400387 ügyszámon a szabadalmi ügyvivő szakértők jóváhagyásával a konstrukció szabadalmi bejelentése megtörtént.

A kutatás kezdeti szakaszában végzett szakirodalmi áttekintés során azt tapasztaltam, hogy ugyan gyakran alkalmazott módszer a crashbox fejlesztések alkalmával a fémhab integráció, vagyis abszorber töltésként való alkalmazásuk. Azonban ezek maximális kihasználása csak a crashbox szerkezet teljes gyűrődése esetén valósulhat meg, hiszen zömítésük a vékonyfalú szerkezet gyűrődésével együtt valósul meg. Ez azt is jelenti, hogy a korábban részletezett porózus anyagokra jellemző ideális energia abszorpciók karakterisztika nem tud érvényesülni.

Ahhoz, hogy a töltésként használt ideális abszorberek teljes térfogatát és gyűrődési karakterisztikáját ki lehessen használni, egy belső dugattyús kialakítású konstrukció megalkotását igényelte, amely az 4. fejezetben bemutatott radiálisan gátolt zömítés elvén működik.

8.1 A technika állásának ismertetése

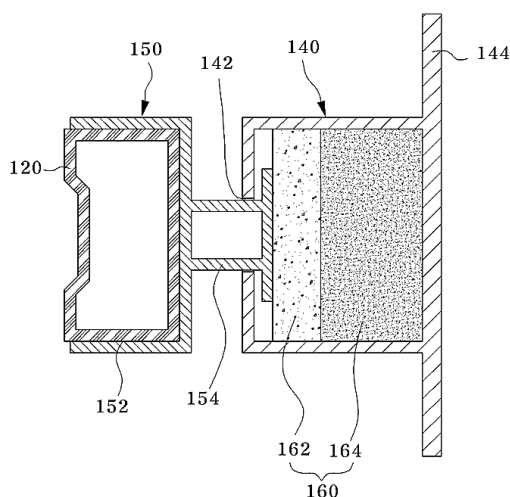
Az 70. ábrán látható KR 100475898 B1 sz. szabadalom egy ilyen belső dugattyús típusú energiaelnyelő berendezést ismertet, melynek működését az alábbiakban részletezem az ábrán használt tételszámok segítségével. A szabadalom fémhabbal töltött konstrukciónak tekinthető, amely egy (37) első résszel és egy abba betolt (41) dugattyúval rendelkezik. Az (37) első rész tartalmaz egy tengelyirányban kiterjedő palástot, amely az egyik végén egy ahhoz szilárdan rögzített (43) első véglemezzel, míg a másik végén egy, ahhoz szilárdan rögzített, a lökhárító keresztartójának megtámasztására szolgáló tartóelemmel van ellátva. A lökhárító keresztartóján egy (31) ütközőhab helyezkedik el, amelyhez egy, az első rész palástjának belsejébe kiterjedő, a palást felőli végén egy (41) nyomólappal ellátott (39) dugattyúrúd csatlakozik szabadon. Az első rész palástja, az első véglemez és a nyomólap által meghatározott változtatható térfogatú térrészben egy, a külső ütközőhabnál nagyobb energiaelnyelő képességű energiaelnyelő anyag van töltve. Ütközéskor először a külső ütközőhab zömül, majd az ahhoz csatlakozó dugattyúrúd és nyomólap mozdul el tengelyirányban a nagyobb energiaelnyelő képességű hab felé. Az itt ismertetett energiaelnyelő berendezés hátránya, hogy bár ki van használva a külső ütközőhab előnyös gyűrődési karakterisztikája, a szabad zömítés miatt kisebb az általa felemészthető ütközési energia, mint amilyenre radiálisan gátolt zömítés esetében alkalmas lenne. Továbbá az első részben lévő nagyobb energiaelnyelő-képességű hab zömülési hossza legfeljebb az ütközés által okozott dugattyúrúd elmozdulásával egyenlő.



70. ábra KR 100475898 B1 sz. szabadalom egyszerűsített ábrája (Forrás : KR 100475898 B1)

Az 71. ábrán látható KR 42789874 B1 sz. szabadalom szintén egy dugattyús kialakítással rendelkező energiaelnyelő berendezést ismertet, amely egy tengelyirányban kiterjedő (140) első résszel és egy, az első részbe betolt (154) második résszel rendelkezik. Az (140) első rész tartalmaz egy tengelyirányban kiterjedő palástot, amely mindkét végéhez szilárdan rögzített (144) véglemezzel van ellátva. A palást első végén lévő véglemez a gépjárműhöz csatlakozó vázszerkezetre van rögzítve, míg a másik véglemezen egy (142) nyílás van kialakítva, amelyen keresztül a (150) második rész tengelyirányban kiterjedő ütközőeleme van bevezetve

csúsztatható módon. Az ütközőelem szabad végén egy, a (120) lökhárító keresztartójának rögzítésére szolgáló (150) befogóelem található. Az (140) első rész palástja, annak első végén lévő véglemez és az ütközőelem egy változtatható térfogatú térrészt határol el, amely egy (160) energiaelnyelő elemmel van megtöltve. Az (160) energiaelnyelő elem egy, az ütközőelemmel érintkező (162) alacsonyabb energiaelnyelő képességű habrétegből és egy ahhoz kapcsolódó (164) nagyobb energiaelnyelő képességű habrétegből áll. Ütközéskor a (120) lökhárító keresztartóval ellátott (154) ütközőelem elmozdul tengelyirányban az energiaelnyelő elem felé, ezáltal az (162) alacsonyabb energiaelnyelő képességű habréteg zömül. Ezt követően amennyiben az ütközési energia nagyobb az (162) első habréteggel elnyelt energiamennyiségnél, az alatta lévő (164) nagyobb energiaelnyelő képességű habréteg is zömül, és végül adott esetben az (140) első rész palástja gyűrődik. Az itt ismertetett energiaelnyelő berendezés hátránya, hogy az energiaelnyelő elem zömülési hossza a második rész tengelyirányú elmozdulásával egyenlő. Ezen kívül a találmányi leírás nem ismerteti a gyárthatósági és összeszerelhetőségi szempontokat sem.

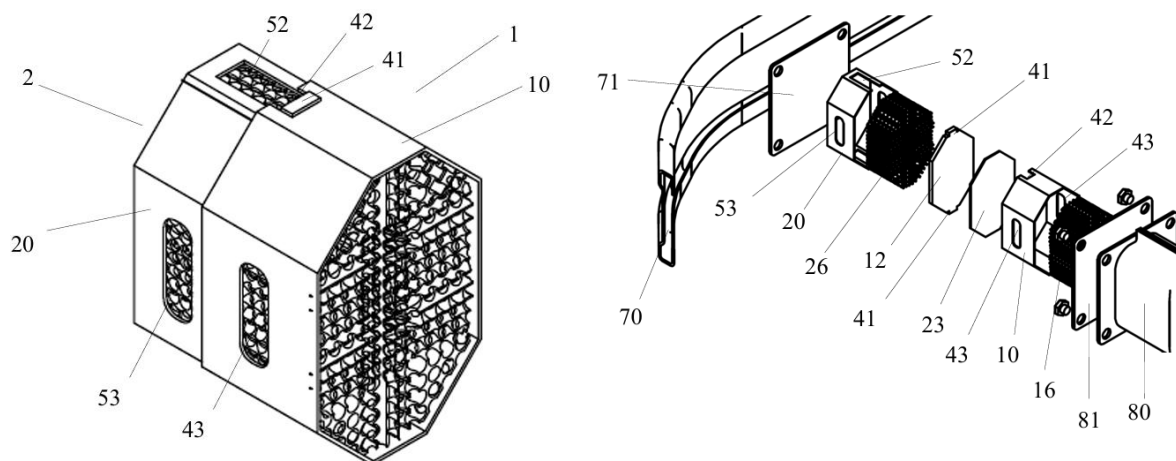


71. ábra KR 42789874 B1 sz. szabadalom egyszerűsített ábrája (Forrás : KR 42789874 B1)

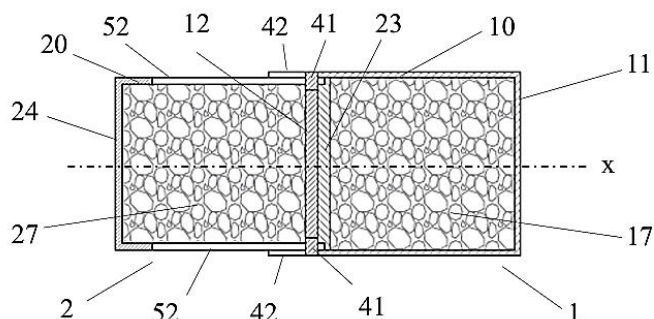
Az általam fejlesztett találmány szerinti megoldás célja a fent említett hátrányok kiküszöbölése és ezáltal egy olyan energiaelnyelő berendezés megvalósítása volt, amely fokozott energiaelnyelőképeséggel rendelkezik, könnyen gyártható és összeszerelhető, valamint a tömegoptimalizációt is figyelembe veszi és nem utolsó sorban újrahasznosítható. A crashbox-okra jellemzése szolgáló SE (Stroke Efficiency) értéket azáltal növeltem, hogy a fejlesztett konstrukció belső kialakításának köszönhetően a crashbox hosszában bekövetkező egységnyi deformáció, a szerkezet belsejében két egységnyi abszorber zömülést hoz létre. Ezt a megoldást a deformáció áttétel fogalmával definiáltam.

8.2 A szerkezet felépítése és működése

Amint az 72. ábrán látható, a találmány egy első aspektusa szerinti energiaelnyelő berendezés, amely egy (1) első részből és egy, az (1) első részbe betolható (2) második részből álló, egy x-tengely irányában kiterjedő, jellemzően vékonyfalú teleszkópos szerkezettel rendelkezik. A találmány szerinti energiaelnyelő berendezés részletes felépítését a 72. és 73. ábrák segítségével ismertetem.



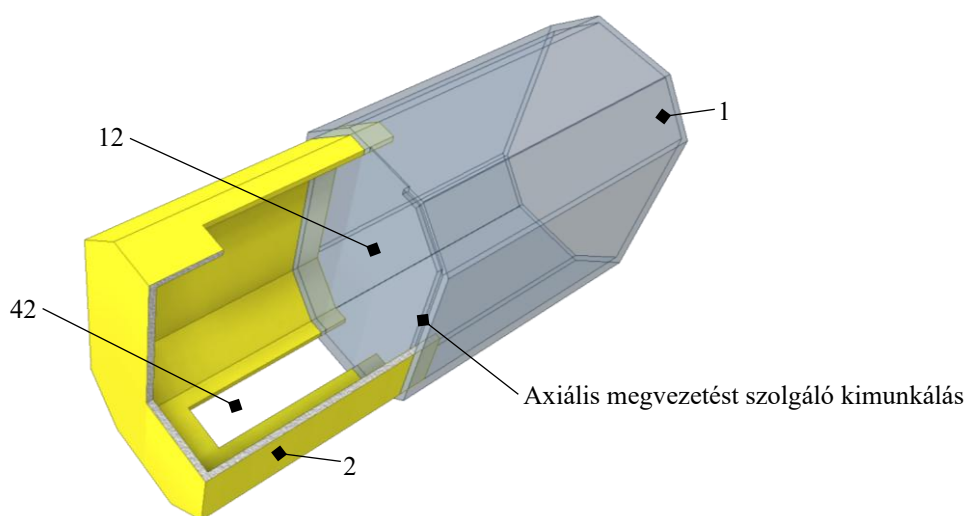
72. ábra Az energia elnyelő berendezés felépítése összeszerelt és robbantott ábrán



73. ábra A szerkezet sematikus ábrája a belső működési mechanizmus ismertetéséhez [KJ133]

Az (1) első rész tartalmaz egy, az x- tengely irányában kiterjedő (10) első palástot, amely jellemzően kör, sokszög, vagy jelen esetben nyolcszög alakú profillal rendelkezik. A crashbox szerkezetek keresztmetszeteinek hatását az energia abszorpcióra és a gyűrődési jellemzőre a 5. fejezetben a végeselemes analízis bemutatásán keresztül már ismertettem. Az (1) első rész tartalmaz továbbá egy, a (10) első palásthoz annak egy első végén szilárdan, például hegesztéssel rögzített (11) első véglemezt és egy, a (10) első palásthoz annak egy második végén, horonyba illeszkedő és szilárdan rögzített (12) második véglemezt, amelyek jellemzően egyaránt az x-tengelyre merőleges síkokban terjednek ki.

A (12) második véglemez két ellentétes élén például egy, a véglemez síkjában kiterjedő (41) füllel rendelkezik, amely a (10) első palástnak a (12) második véglemez felőli végén a megfelelő oldalain kialakított komplementer alakú (42) kivágásban rögzíthető és pozícionálható. A véglemezek ilyenfajta rögzítése kiváltható, a 74. ábrán látható kialakítással. Itt egy marással, szikrafogácsolással vagy egyéb precíziós megmunkálásra alkalmas megoldással egy, az aktuálisan alkalmazott keresztmetszet (jelen esetben nyolcszög) típussal párhuzamos kimunkálást készítünk, amely a (2) rész axiális megvezetését szolgálja. Ennek megfelelően a megvezetésre szolgáló kiképzés szélesség (s) és a (2) rész falvastagságának névleges értéke megegyezik.



74. ábra A véglemezen kialakított, az axiális megvezetést szolgáló kimunkálás

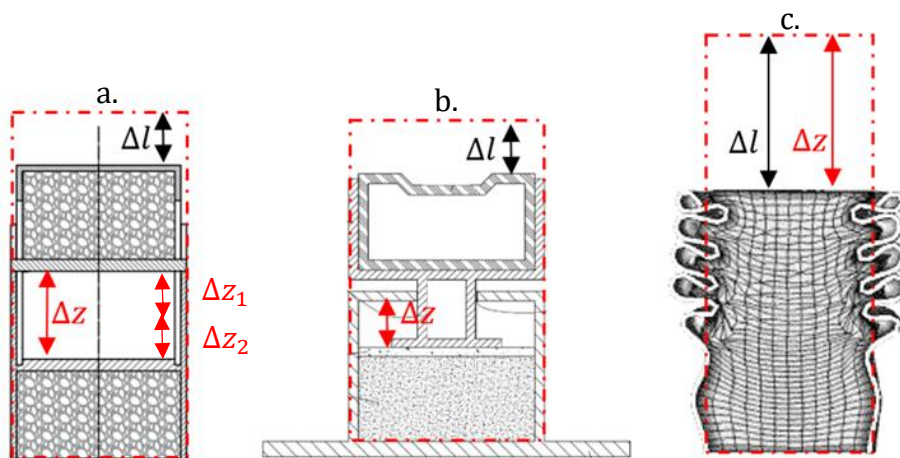
A (2) második rész tartalmaz egy, az x-tengely irányában kiterjedő (20) második palástot, amely becsúsztható a (10) első palástba annak a (12) második véglemez, vagy a most bemutatott precíziós kimunkálással ellátott vége felől. A találmány első aspektusa szerinti energiaelnyelő berendezésnek a 73. ábrán látható kiindulási helyzetében a (23) harmadik véglemez célszerűen a (12) második véglemez és a (11) első véglemez között helyezkedik. A (20) palástnak a (10) első palást (42) kivágásaival megegyező oldalain jellemzően egy-egy (52) megvezető horony van kialakítva, amelyben a (12) második véglemez (41) füle csúsztható módon van megvezetve, tehát laza illesztéssel szerelt.

Az ily módon kialakított (20) második palásthoz illesztett (23) harmadik véglemez és hegesztéssel rögzített (24) negyedik véglemez együtt mozgatható az x-tengely irányában a (10) első palást belső felülete mentén. A (10) első palást és a (20) második palást közötti csatlakozás kialakítható átmeneti vagy szilárd illesztéssel, vagy anyaggal záró kötéssel, például ragasztással vagy hegesztéssel. Amint a 73. ábrán bemutatott egyszerűsített vázlaton látható, a (10) első

palást, a (11) első véglemez és a (23) harmadik véglemez egy, a működés során változó térfogatú (17) első térrészt határol, amely energiaelnyelő anyaggal van megtöltve, míg a (20) második palást, a (12) második véglemez és a (24) negyedik véglemez egy másik, szintén változó térfogatú (27) második térrészt határol, amely ugyancsak energiaelnyelő anyaggal van megtöltve. A szerkezet teljes tengelyirányú hosszváltozása, mindkét térrészben azonos mértékű zömülést hoz létre. A 72. ábra a találmány első aspektusa szerinti energiaelnyelő berendezésnek egy gépjárműbe történő lehetséges beépítését mutatja be. A (10) palásthoz szilárdan rögzített (11) első véglemez kialakítható például egy, a gépjármű-karosszéria (80) nyúlványához felszerelhető (81) tartólemez részeként, vagy egy ilyen (81) tartólemezhez rögzíthető. A (20) második palásthoz szilárdan rögzített (24) negyedik véglemez kialakítható például a gépjármű lökhárítójának (70) kereszttartójához felszerelhető (71) tartólemez részeként, vagy egy ilyen (71) tartólemezhez például hegesztéssel rögzítéssel.

8.3 Deformáció áttétel

Természetesen a töltétként alkalmazott abszorberek, mint pl. fémhabok által elnyelt energia arányos a zömülésük mértékével. A 75. ábra összehasonlítás céljából készült, ahol az általam fejlesztett konstrukció (75.a) figyelhető meg másik két, gyakran alkalmazott crashbox megoldással összevetve, amely segíti a deformáció áttétel fogalmának értelmezését. A 75.b és 75.c ábrán látható konstrukció típusoknál egységnyi crashbox hossz-változás (Δl) egységnyi abszorber zömülést (Δz) jelent, tehát a $\Delta l = \Delta z$ összefüggés érvényesül. Az általam fejlesztett megoldás, azonban a többtagú kialakításának köszönhetően egységi crashbox hossz-változás (Δl), a szerkezet belsejében kétszeres abszorber zömülést (Δz) képes generálni, vagyis ennek megfelelően $2\Delta l = \Delta z$ ahol a $\Delta z = \Delta z_1 + \Delta z_2$.

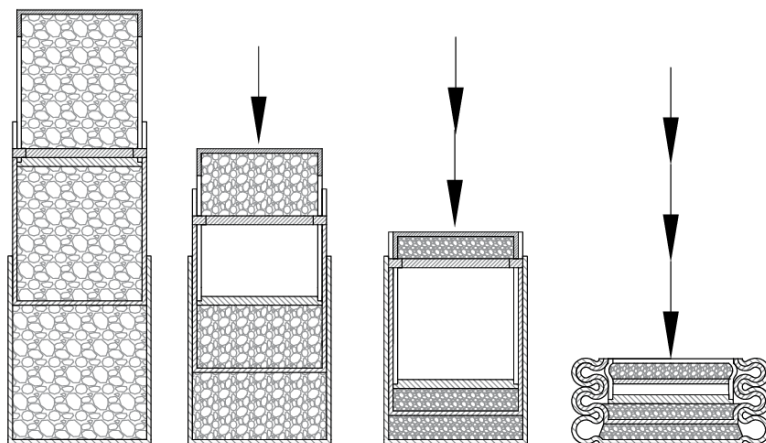


75. ábra Deformáció áttétel fogalmának értelmezése [KJ133]

8.4 Az energia abszorpció folyamata

A találmány első aspektusa szerinti energiaelnyelő berendezés által felemészthető energia a következő komponensek összege:

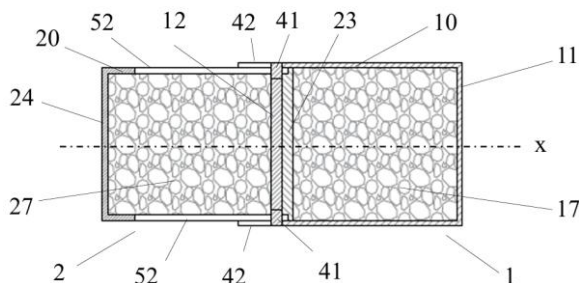
- első komponens: a szerkezet belső mozgása során, az alkatrészek közötti statikus és dinamikus súrlódási erők, és adott esetben csatlakozási (ragasztás, hegesztés, szilárd illesztés) erő legyőzésére szükséges energia,
- második komponens: az (17) első térrészben lévő energiaelnyelő anyag és a (27) második térrészben lévő energiaelnyelő anyag zömítéséhez szükséges energia
- harmadik komponens: a (76. ábra harmadik lépésében látható) teljesen összetolt vékonyfalú palátszerkezetnek a bemutatott módon történő zömítésére, azaz plasztikus deformációjához szükséges energia.

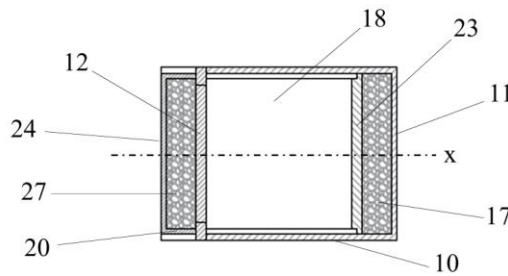


76. ábra Az energia abszorpció folyamata [KJ133]

8.5 A szerkezet mechanizmusa

A továbbiakban a találmány első aspektusa szerinti energiaelnyelő berendezés működését és az energiaelnyelés folyamatát ismertetem az 77. ábra segítségével.





77. ábra A szerkezet egyszerűsített vázlata összeszerelt kezdeti és összetolt helyzete [KJ133]

Jellemzően 8-16 km/óra sebességgel történő ütközéskor, az x-tengelyirányú erő hatására a találmány első aspektusa szerinti energiaelnyelő berendezés a 77. ábrán bemutatott kezdeti helyzetből egy összetolt helyzetbe kerül. A (20) második palástnak a (10) első palástba történő becsúsztatása során játszódik le az energiafelvételi folyamatnak a fent ismertetett első és második komponensekhez tartozó szakasza. Az energiaelnyelő berendezés működése a (20) második palástnak a (10) első palástba történő elmozdulásával kezdődik, amelyhez szükséges a közöttük létrehozott csatlakozási erő legyőzése. Vagyis a crashbox szerkezetekre jellemző kezdeti csúcserő mértékét, és ezáltal az energia abszorpció kezdetét a palástok között kialakított kötés nyírásához szükséges nyíróerő határozza meg és nem a vékonyfalú szerkezet falvastagsága és gyűrődést segítő konstrukciós megoldások (pl. bordák, kúpos kialakítások) megléte, vagyis a kezdeti csúcserő függetleníthető a szerkezet geometriájától és annak falvastagságától. Célszerűen úgy kell a csatlakozási, illetve kötési erőt méretezni, hogy az energiaelnyelő berendezés 8-16 km/óra sebességtartományban megvalósuló ütközéskor működésbe lépjen, azaz a kezdeti ütközési energia elegendő legyen a statikus súrlódási erő, illetve a kötési erő legyőzéséhez.

Ezt követően a (20) második palást a (10) első palástba csúszik be, amely során dinamikus súrlódás ébred az egymáson elmozduló alkatrészek kontaktfelületei között. Súrlódás ébred a palástok között, a nyomólapok és a palást belső felülete között, valamint a abszorber töltet és a palást belső oldala között. Ezt, a radiálisan gátolt zömítés során jelentkező súrlódási esetet vizsgáltam a 4. fejezetben, amely alapján kijelenthető, hogy a súrlódási együtthatók növelésével fokozhatjuk a szerkezet energia elnyelő képességét, hiszen a súrlódási erők értékét befolyásolja a palástok anyagainak párosítása, a felületi érdesség és a palástok közötti illesztés mértéke.

A berendezés által elnyelhető energia második komponensét az energialelnyelő berendezésbe töltött energiaelnyelő anyag teljes zömítéséhez szükséges energia jelenti. A crashbox belsejében töltetként alkalmazott energiaelnyelő anyag radiális irányú deformációját a (10) első palást, illetve (20) második palást gátolja. Ennek köszönhetően az energiaelnyelő

anyag cellaszerkezetének szabadságfokainak száma csökken, növelve ezzel annak szerkezeti merevségét és ezáltal az alakváltozással szembeni ellenállását is.

Ütközéskor történő összetolás hatására a találmány első aspektusa szerinti energiaeinyelő berendezésben az energiaeinyelő anyagban keletkező zömítés teljes hossza egyenlő a (17) első térrészben lévő energiaeinyelő anyag zömítési úthosszának és a 27 második térrészben lévő energiaeinyelő anyag zömítési úthosszának összegével, ami a külső összetolási úthossz kétszerese. Ezzel szemben a technika állásában ismertetett dugattyús kialakítású energiaeinyelő berendezésben a belső zömítési úthossz csupán a külső összetolási úthosszal egyenlő. Tehát a találmány első aspektusa szerinti energiaeinyelő berendezésnél az elnyelhető energiamennyiség növelhető a technika állásában ismertetett dugattyús kialakítású energiaeinyelő berendezésekhez képest.

A (10) első és (20) második palást összetolása a (17) első térrészben és a (27) második térrészbe töltött energiaeinyelő anyag felkeményedésével fejeződik be. Az egyes energiaeinyelő anyagok tehát teljes térfogatukban teljes mértékben zömíthetők, kihasználhatók.

A találmány szerinti energiaeinyelő berendezés további előnye, hogy működésének ezen szakaszáig a berendezés szétszerelhető és javítható, ugyanis a (20) második palást kihúzható a (10) első palástból a kezdeti helyzetig és a (17) első térrészben és a (27) második térrészbe integrált, például (19), illetve (29) tömbként kialakított energiaeinyelő anyag cserélhető.

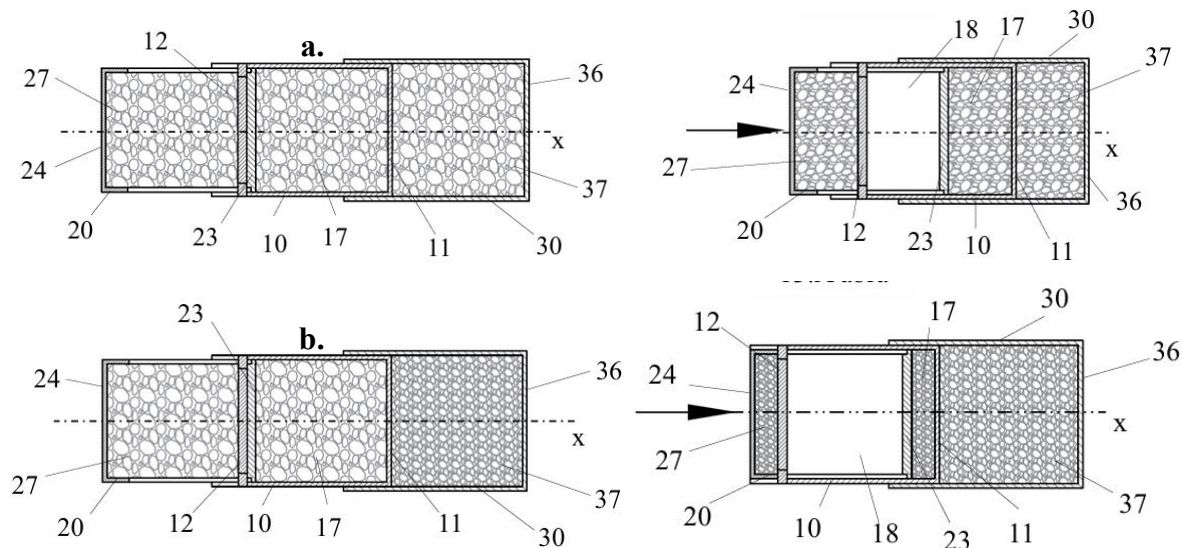
Amennyiben az ütközési energia nagyobb az energiaeinyelő berendezés teljes összetolásáig elnyelt energiánál, akkor megkezdődik a teljesen összetolt vékonyfalú palástszerkezetnek zömítése, vagyis plasztikus deformációja. Amint a 77. ábrán látható, a teljesen összetolt energiaeinyelő berendezés falvastagsága a (10) első palást és a (20) második palást falvastagságának összege, ami növeli az összetolt vékonyfalú palástszerkezetnek a zömítéssel szembeni ellenállóképességét és ezáltal növeli a vékonyfalú palástszerkezet zömítése során elnyelhető ütközési energiamennyiséget. A zömítés ezen szakaszában a felemészthető energiamennyiséget befolyásolják például a (10) első palást és (20) második palást anyaga, geometriai jellemzői, például a keresztmetszete és az azon kialakított hornyok, furatok és kivágások, vagyis a törésindítók megléte, azok típusa és száma, ahogy az a 5. fejezetben ismertetett végelelemes analízissel is igazoltam.

8.6 A működési elvet alkalmazó konstrukciós változatok

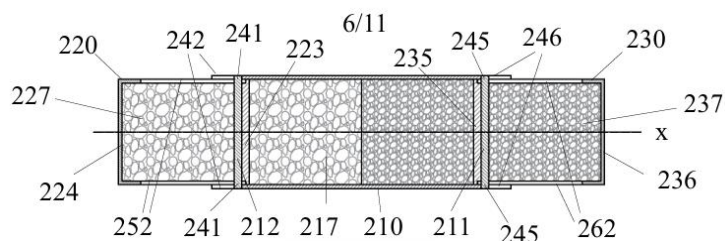
Amint az 78.a és 78.b ábrákon látható, a találmány első aspektusa szerinti energiaeinyelő berendezés egy előnyös kiviteli alakjánál az (1) első rész beágyazható annak első végénél egy további (3) harmadik részbe, a berendezés energiaeinyelő képességének növelése céljából. A

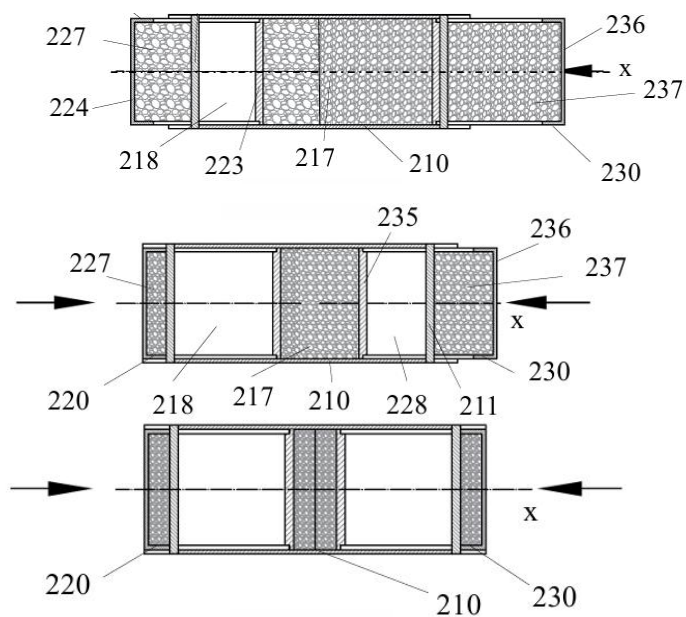
(3) harmadik rész tartalmaz továbbá egy, a (30) harmadik palásthoz annak egy első végén szilárdan rögzített, például hegesztett (36) hatodik véglemezt. Ahogy az a 78.a és 78.b ábrán is látható a belső térrészekben alkalmazható azonos és eltérő sűrűségű és ezáltal eltérő energia elnyelő képességű abszorber is. Eltérő abszorberes esetén, ahogy azt a soros és párhuzamos elrendezésű fémhab vizsgálatoknál igazoltam az 6. fejezetben mindig az alacsonyabb sűrűségű abszorber zömülése kezdődik meg. A (10) első palást és a (30) harmadik palást közötti rögzítés kialakítható laza vagy szoros illesztéssel, illetve anyaggal záró kötéssel, például ragasztással vagy hegesztéssel.

A szerkezet energia abszorpciójának növelése céljából létre hoztam egy további konstrukciót, ahol a (210) belső palást hosszát megnőveltem és ezáltal a teleszkóp mechanizmus a szerkezet mindkét végén kialakítható. A szabadalmi leírásban ez a változat a találmány második aspektusa néven került megfogalmazásra, ezért a későbbiekben eszerint hivatkozok rá. Ezen koncepció felépítését mutatja a 79. és 80. ábra, amelyen látható, hogy szintén alkalmazható töltetként azonos és eltérő abszorber is. A 81. ábra a fejlesztett konstrukciók vagyis a találmány első és második aspektusa szerinti energiaelnyelő berendezést mutatja be egy előnyös beépített helyzetben.

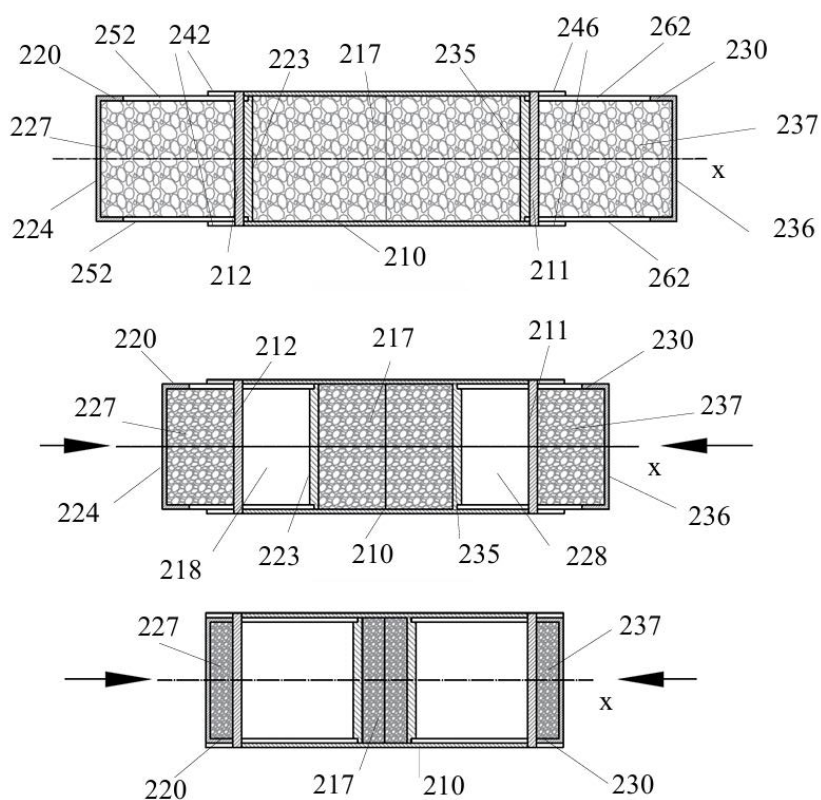


78. ábra A találmány első aspektusa szerinti energiaelnyelő berendezés előnyös kiviteli alakjai [KJ133]

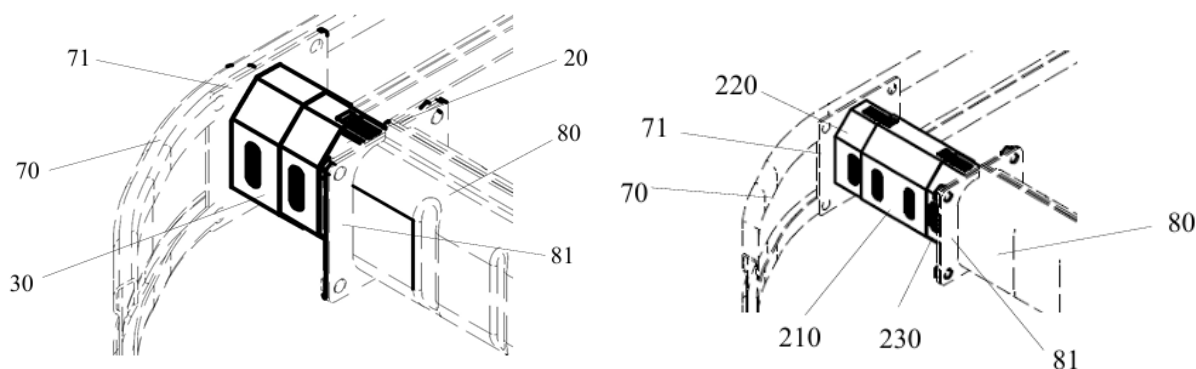




79. ábra A találmány második aspektusának zömítési lépései eltérő abszorber töltet esetén [KJ133]



80. ábra A találmány második aspektusának zömítési lépései azonos abszorber töltet esetén [KJ133]



81. ábra A konstrukciók felhasználási lehetősége

8.7 Zömítő vizsgálatok

A fejlesztett konstrukció egy egyszerűsített kör keresztmetszetű változatát gyártottam le és szereltem össze kísérleti próbadaraboknak, hogy igazolni tudjam a feltételezett működési mechanizmust mind az első mind a második aspektusára vonatkozóan. Az előző fejezetekben bemutatott a szerkezet palástjaként szolgáló alkatrészeket 1,5 mm falvastagságú alumínium csőből alakítottam ki. A belső nyomólapokhoz, 3 mm-es falvastagságú szintén alumínium lemezt használtam, melyeket vízsugaras vágással készítettem el. A szükséges alkatrészeket 82. ábra mutatja összeszerelés előtt. A 97. oldalon már említett a palástok egymáshoz viszonyított rögzítésére vonatkoztatott laza, szoros és anyagzáró kötések közül a méréshez a laza illesztés használtam, mivel a vizsgálat elsődleges célja a működési mechanizmus igazolása és nem a kezdeti csúcserő vizsgálata volt.



82. ábra A méréshez használt próbadarabok összeszerelés előtt

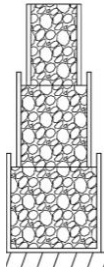
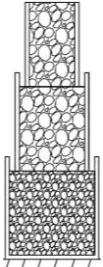
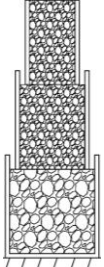
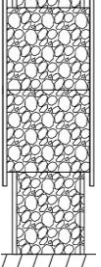
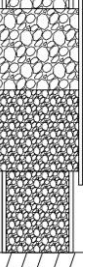
A próbadarabokat a fémhab vizsgálatokhoz is használt ISTRON 8801 típusú anyagvizsgáló berendezést használtam, és a próbadarabok eredeti méretéhez képest 80 %-os névleges alakváltozást idéztem elő. Az összeszereléshez nem használtam kenőanyagot, hogy a működés során szárazsúrlódás tudjon érvényesülni a szerkezet alkatrészei között. A tagokat egymáshoz képest sem ragasztással, sem hegesztéssel nem rögzítettem, hogy fókuszálni tudjak a szerkezet mozgására és a mérést ne befolyásolja a kezdeti csúcserő kérdése. A szerkezetek belső abszorber töltetéhez a korábbi vizsgálataim tárgyát képező zártcellás alumínium habokat

használtam kétféle ($0,43$ és $0,68 \text{ g/cm}^3$) sűrűségű változatban. A habok jellemzően 30 mm névleges átmérővel és 30 magasságúak voltak a (10) és (230) palástok esetében, a (20), (220) és (230) részek megtöltésére pedig 27 mm -es átmérőjűt. A zömítő vizsgálat előtti, összeszerelt állapotokról készített fényképeket a 83. ábra mutatja. A mindkét konstrukciót azonos és eltérő sűrűségű fémhab töltetekkel szerelve is megvizsgáltam, hogy elemezni tudjam a szerkezet működését. Az ismételhetőség ellenőrzése érdekében minden változatot kétszer mértem le, ami összesen tíz mérővizsgálatot jelentett. A vizsgálathoz használt koncepciók egyszerűsített felépítését és azok jelöléseit a 22. táblázatban foglaltam össze, hogy jobban nyomon követhetők és megérthetők legyenek az elemzéshez tartozó leírások.

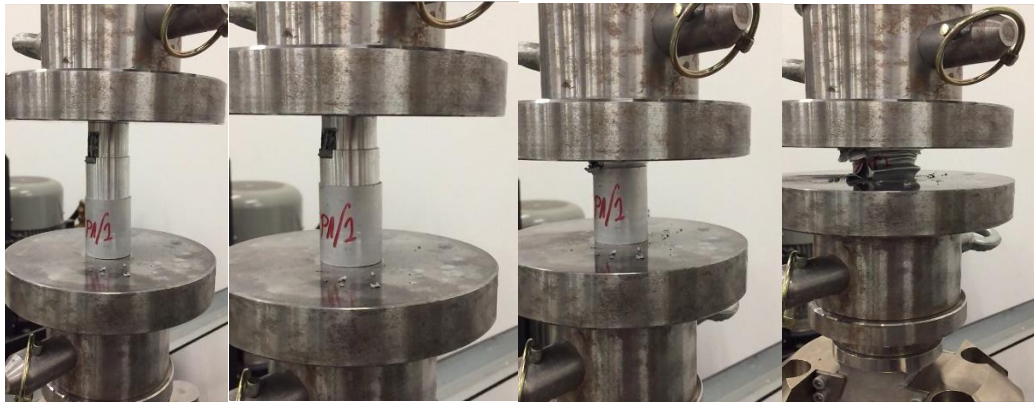


83. ábra A próbadarabok a zömítő vizsgálatok előtt

22. táblázat A vizsgálathoz használt próbadarabok jelölései és az egyes alkatrészek tömege

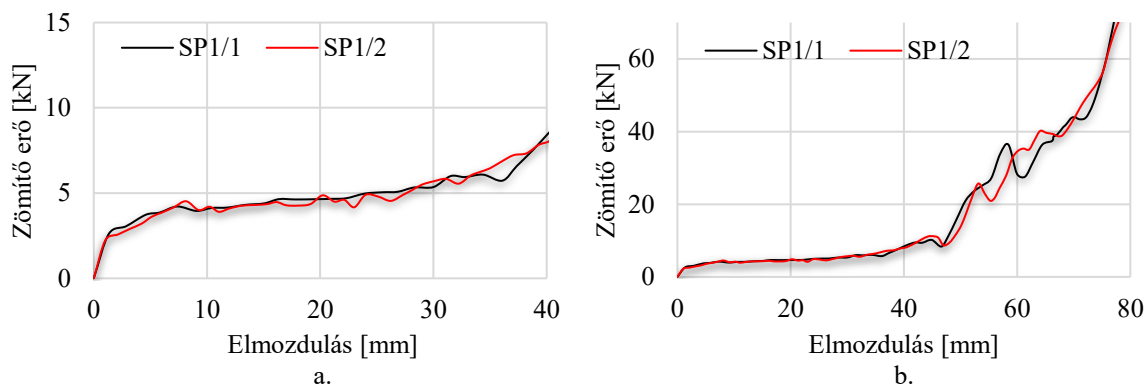
Felépítés											
Jelölés		SP1/1	SP1/2	SP2/1	SP2/2	SP3/1	SP3/2	SP4/1	SP4/2	SP5/1	SP5/2
m fémhab [g]		21,79	21,52	28,06	27,83	29,53	30,92	26,37	27,74	35,41	35,41
m crashbox [g]		22,59	22,61	22,38	22,76	22,64	22,50	29,60	29,95	29,77	29,92
m lemez [g]		10,26	10,29	10,29	10,26	10,28	10,29	20,54	19,91	19,12	19,10
m összesen [g]		54,64	54,42	60,73	60,85	62,45	63,71	76,51	77,6	84,3	84,43

Elsőként a találmány első aspektusának továbbfejlesztett változatát, vizsgáltam azon belül is, mindhárom tagban azonos sűrűségű ($0,43 \text{ g/cm}^3$) fémhabot használva, vagyis az SP1/1 és SP1/2 jelölésű próbadarabokat. A vizsgálat során készített felvételeket a 84. ábrasorozat mutatja, amelyen jól megfigyelhető a szerkezet működésének főbb szegmensei.



84. ábra A SP1 jelölési próbadarab zömülésének főbb lépései

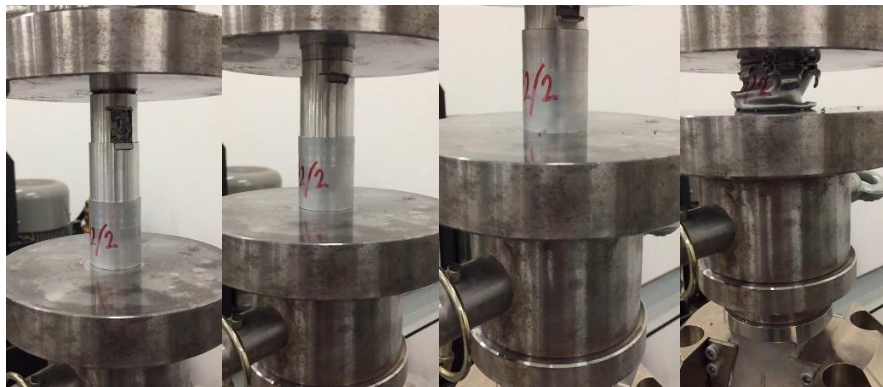
Mivel mind három tagban azonos sűrűségű abszorbert használtam, ezért az egymásba tolódás mértéke azonos volt a felső tagok és az alsó tagok esetében is, ahogy azt a mérést megelőzőn feltételeztem. A 84. ábra harmadik lépésében már a teljesen összetolódott állapot látható, amelyet a palátszerkezet plasztikus deformációja követett. A mérés során rögzített erő-elmozdulás karakterisztikát mutatja az 85. ábra. Az elnyelt energia tekintetében a 80 mm-es deformációs alakváltozás során az SP1/1 1,52 kJ energiát volt képes elnyelni, a mérés ismétléséhez használt SP1/2 próbadarab esetén pedig 1,58 kJ energia abszorpció valósult meg, vagyis a mind a karakterisztika mind az energia abszorpció mértéke reprodukálható volt.



85. ábra A 1.sz. konstrukció zömülési karakterisztikája azonos fémhab töltet (SP1) esetén (a. szerkezet belsejében történő fémhab zömülés; b. a teljes szerkezet zömülési karakterisztikája) [KJ133]

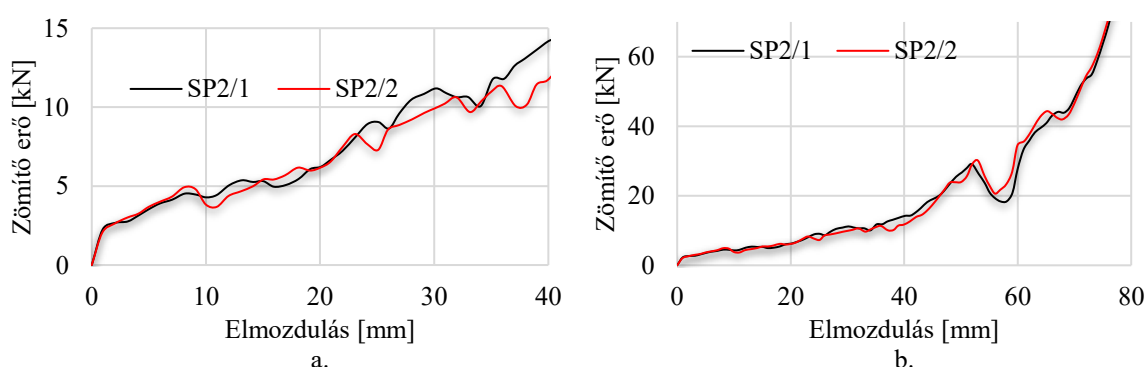
A második lépésként az SP2/1 és SP2/2 próbadarabokon végeztem zömítő vizsgálatokat. Ennél a konstrukciónál már az alsó tagban a nagyobb sűrűségű ($0,68 \text{ g/cm}^3$) míg a felső két tagokban $0,43 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű fémhabot használtam a 22. táblázatban ismertetett módon. A mérés során készített felvételekből jól megfigyelhető, hogy először a felső két tagban lévő alacsonyabb sűrűségű habok zömülnek, majd amikor megindul azok felkeményedése, az alsó tagban lévő nagyobb sűrűségű hab zömítése is megkezdődik, amelyet a palátszerkezet plasztikus deformációja majd teljes tönkremenetele követ, ahogy azt a konstrukció kidolgozásának kezdetén is feltételeztem. Az zömülési folyamatot a 86. ábra mutatja, a mérés során kapott

eredmények pedig az 87. ábrán figyelhetők meg. A nagyobb sűrűségű hab miatt a szerkezet energia abszorpciós képessége is nőtt, hiszen a SP2/1 és SP2/2 próbadarab esetében is 1,77 kJ energia abszorpció valósult meg ami 18 %-al többet jelent az azonos típusú habot tartalmazó konstrukcióhoz (SP1) viszonyítva.



86. ábra A SP2 jelölési próbadarab zömülésének főbb lépései

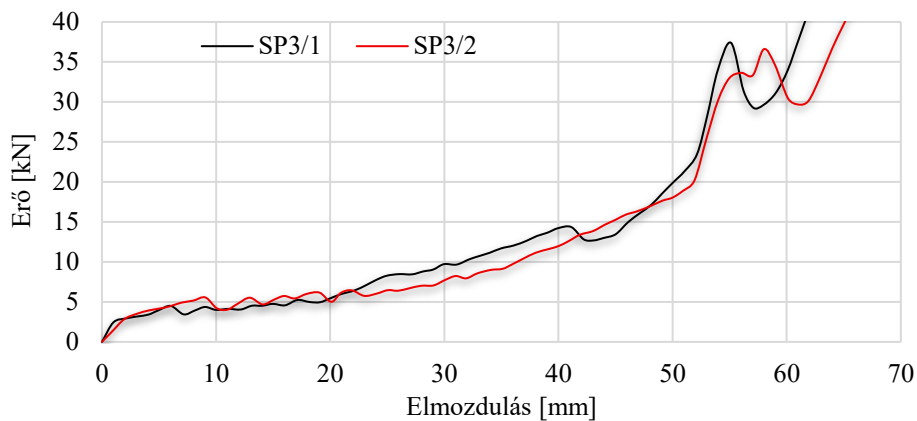
Mindkét változatra vonatkozó vizsgálat igazolta, hogy a konstrukció segítségével megtarthatjuk a fémhabokra jellemző előnyös gyűrődési karakterisztikát, hiszen továbbra is jól megfigyelhető a plató szakasz, amelyet a palást plasztikus deformációja követ. Az SP2 típusú változatnál jól érvényesül a nagyobb sűrűségű fémhab hatása a gyűrődésre, hiszen a plató szakasz egy meredekebben emelkedő karakterisztikát eredményezett, ahogy azt a 5. fejezetben végzett radiálisan gátolt zömítési teszteknel is tapasztaltam. A crashbox szerkezeteknél jelentkező kezdeti csúcserő probléma, már csak a gyűrődési szakasz végén jelentkezik. Erre már csak akkor kerülhet sor, ha az alkalmazott abszorber energia elnyelő képessége nem volt elegendő az ütközési energia teljesmértékű elnyelésére.



87. ábra A 1.sz. konstrukció zömítési karakterisztikája eltérő fémhab töltet (SP2) esetén (a. szerkezet belsejében történő fémhab zömülés; b. a teljes szerkezet zömítési karakterisztikája)

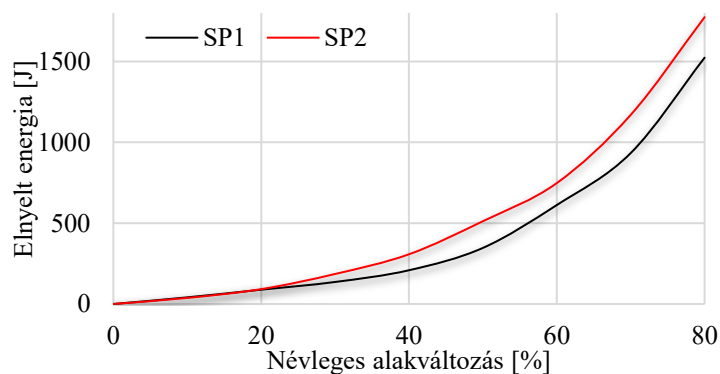
Az SP3 jelölésű próbadarab alsó szegmensében található a kisebb sűrűségű töltet, míg a felső két tagban azonos, nagyobb sűrűségű. Ezek alapján a feltételezett működési mechanizmus, hogy az alsó tagban lévő hab fog először zömülni, majd annak felkeményedése esetén indul meg a felső két tag egymásba csúszása a deformáció áttétel érvényesülése mellett. A zömítés

során rögzített diagramon jól megfigyelhető, hogy a deformáció első 20 mm-es szakaszában a kisebbik sűrűségű töltet zömült, majd ezt követte egy meredeken emelkedő szakasz amely már a kisebb porozitású habbal töltött tagok egymásba tolódását írja le. Az SP3 jelölésű próbadarab karakterisztikája a 88. ábrán figyelhető meg.



88. ábra Az SP3 jelölésű próbadarab zömülési karakterisztikája

A 89. ábra pedig már a találmány első aspektusára vonatkozó energia abszorpció alakulását mutatja a névleges zömítési hosszváltozás függvényében. A célom az volt, hogy egy minél meredekebb abszorpciós függvényt kapjak, hiszen ennek köszönhetően az adott crashbox szerkezet a gyűrődés függvényében egy egyre nagyobb energia elnyelési képességgel tud működni, vagyis minél nagyobb deformáció érvényesül, annál inkább növekszik a szerkezet abszorpciós kapacitása, miközben nem érvényesül a kezdeti csúcserő probléma és a zömítési erő fluktuáció. Az SP1 koncepció esetén az első 40 mm-es zömülés energia abszorpciós karakterisztikája lineáris, vagyis itt történik meg a fémhab töltet plató szakasza által történő energia elnyelés. Viszont ez a kezdeti linearitás az abszorpciós függvényénél az SP2 konstrukciónál már rövidebb, számszerűleg 23 mm. Ez azt jelenti, hogy a nagyobb sűrűségű fémhab sokkal hamarabb felkeményedett a szerkezet belsejében.



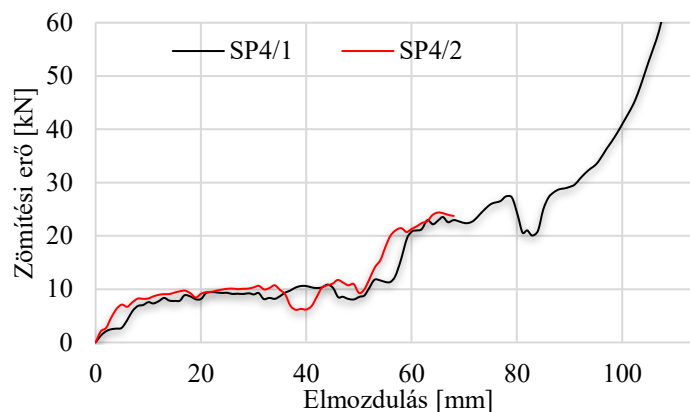
89. ábra Az SP1 és SP2 próbadarabok abszorpciós karakterisztikája

A most következő fejezetben a találmány egy tovább fejlesztett változatának, vagyis második aspektusának zömítési vizsgálatát fejtem ki. A 22. táblázat szerint ebben a fejezetben a SP4/1; SP4/2 és egy más fémhabösszetételt alkalmazó SP5/1 és SP5/2 jelölésű próbatesteket használtam. Mivel ez a konstrukció a szerkezeti elrendezése miatt 50 mm-rel magasabb, mint a találmány első aspektusa, ezért a mérőgép nyomólapjainak újra pozicionálása, és a zömítési lökethossz megnövelésre volt szükség. A vizsgálatot szintén 80 %-os névleges alakváltozással szerettem volna megvalósítani, ezért a zömítési löketet 112 mm-re állítottam. Az 90. ábra az SP4 típusú koncepció zömülési folyamatát mutatja.



90. ábra SP4 típusú koncepció zömülési folyamata

Ebben az összeállításban a crashbox szerkezet teljes térfogatában azonos sűrűségű ($0,4 \text{ g/cm}^3$) zártcellás alumínium habot használtam. A mérés során azonban azt tapasztaltam, hogy a bár a szerkezet a feltételezett zömülési sorrendet követi, viszont a növelt fémhab térfogat miatt, a palást szerkezet és a kiegészítő alkatrészek (nyomólapok) plasztikus deformációja a vártnál hamarabb megindult. Ez látszik az 90. ábra harmadik lépésénél is, hogy a szélső palástok közötti nyomólapok olyan mértékben deformálódtak már a fémhab zömítés során is, hogy ez torzította a szerkezet szimmetrikus zömülését. Ráadásul ebből adódóan a szerkezet stabilitása csökkent, és a kihajlás jeleit mutatta. Ez a kihajlási probléma az ismétlődő mérésnél (SP4/2) még erőteljesebben érvényesült, ráadásul olyan mértékben, hogy a mérést meg kellett szakítani. Ezért a 91. ábrán látható mérési diagramok SP4/2-re vonatkozó görbéjét, csak 67 mm-es deformációig tudtam ábrázolni, viszont ebben a tartományban a szerkezetre jellemző zömülési karakterisztika reprodukálható volt. Az első 50 mm-es zömülési szakaszban látható a fémhab plató szakasza, amelyet a palástszerkezet és kiegészítő alak. A 92. ábra pedig a kihajlás esetét mutatja.



91. ábra SP4 jelölésű próbadarab zömítési karakterisztikája



92. ábra Az 2.sz. konstrukció zömítése során jelentkező kihajlási probléma

Ahhoz, hogy a szerkezet fémhab zömítési mechanizmusának hatékonyságáról információt kapjak, az elnyelt energia értékeket összehasonlítottam a találmány első aspektusának értékeivel az első 40 mm-es zömítési lökethosszra vetítve. Azért 40 mm-re választottam meg a vizsgálati tartományt, mert ezen belül még nem volt érdemi szerkezeti deformáció, hanem a belső fémhab töltet zömítése történt. Ezen kívül figyelembe vettem az összeszereléskor lemerített térfogati és tömeg jellemzőit a próbadaraboknak, hogy az elnyelt energia értékét ezek függvényében is vizsgálni tudjam. Hiszen, ahogy a 22. táblázat is mutatja, a második konstrukció több hab töltettel bír, ami ezáltal egy nagyobb energia abszorpciós teljesítményt feltételez, de természetesen ez magával vonja a nagyobb tömeget és beépítési helyszükségletet. A találmány első konstrukciójának SP1 változata $55,57 \text{ cm}^3$ fémhab töltettel volt szerelve, ahol a fémhab töltet tömege 21,79 g volt, míg a teljes összeállított konstrukció 54,64 g tömeget jelentett. Ezzel szemben a második konstrukció SP4 címkével jelölt koncepciójához $79,31 \text{ cm}^3$ fémhab töltetet használtam, melynek tömege 31,72 g, a teljes szerkezeté pedig 81,86 g. A zömítés első 40 mm-es szakaszában a találmány rövidebb változata (SP1) 207,59 J energia abszorpcióra volt képes, míg a nagyobb változata (SP4) már átlagosan 328,11 J energiát

igényelt, melynek egységnyi térfogatra kifejezett értéke $4,13 \text{ J/cm}^3$ az SP1 esetben és $3,96 \text{ J/cm}^3$ az SP4 konstrukció esetében. Tömeghatékonyság szempontjából értékelve a szerkezeteket, a kompaktabb (SP1) változat SEA (Specific-Energy Absorbing) értéke $3,71 \text{ J/g}$, az továbbfejlesztett változatáé (SP4) pedig $4,01 \text{ J/g}$. Az energia elnyelő szerkezetek jellemezhetők a SE (Stroke-Efficiency) értékével, amely az energia abszorpció során bekövetkezett hosszváltozást fejezi ki. Az esetemben mivel minden mérésnél nem a kezdeti mozgási energia, hanem az elmozdulás mértéke volt a bemenő paraméter, ezért az SE értéket az elnyelt energia és a hozzá tartozó elmozdulás hányadosaként határoztam meg az előző fejezetekhez hasonlóan. Mivel a méréseket megelőzően az próbadarabot felépítő összes alkatrész tömegét lemértem, ezért a SEA értékek is meghatározhatók voltak, ezeket a 23. táblázatban foglaltam össze. Ezen táblázat értékeiből jól látható, hogy mindkét konstrukció nagyon hasonló térfogat egységre vetített energia abszorpciós képességgel rendelkezik, vagyis az alkalmazott fémhab töltet kihasználása mindkét esetben jó hatásfokú.

23. táblázat A konstrukciók abszorpciós értékei 40mm-es alakváltozásig

	1.sz. konstrukció		2.sz. konstrukció	
	SP1/1	SP1/2	SP4/1	SP4/2
$EA_{0-40} [\text{J}]$	208,75	206,43	314,21	342,00
$SEA_V^{0-40} [\text{J/cm}^3]$	3,74	3,71	3,96	4,31
$SEA_m^{0-40} [\text{J/g}]$	3,82	3,77	3,83	4,17

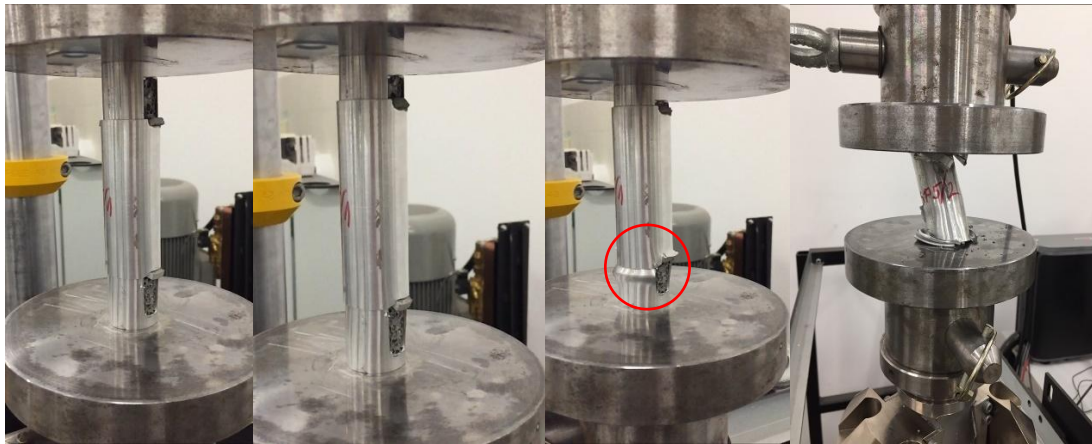
8.7.1 Stroke Efficiency (SE)

A következőkben a SE értéket használtam ahhoz, hogy igazolni tudjam az általam fejlesztett szerkezet hatékonyságát. Az SE, ahogy az 3.4 fejezetben bemutatásra került a zömítési lökethossz függvényében fejezi ki az elnyelt energia mennyiséget. Léteznek olyan lökhárító konstrukció megoldások, ahol tisztán fémhab tömböket használnak ütközési energia abszorberként, kiegészítő szerkezetek nélkül. Ezért fontosnak tartottam megvizsgálni, hogy a találmány hogyan képes hasznosítani az alkalmazott fémhab töltetet, ezért meghatároztam a $0,4 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű hengeres próbadarab szabadzömítésnél az egységnyi elmozdulásra számított elnyelt energia értékét majd összehasonlítottam az SP1 zömítésével a deformáció áttétel érvényesülése mellett. Mivel ebben a szerkezetben használt fémhab töltet jellemző névleges átmérője 30 mm, ezért a szabadzömítéshez is 30mm-es átmérőjű habot használtam. Az 84.b ábra alapján megfigyelhető, hogy a szerkezet zömülése két fő részre bontható. Nagyságrendileg 50 %-os alakváltozásig a fémhab töltet zömítése történik, amelyet a héjszerkezet plasztikus deformációja követ. Mivel a célom a szerkezeten belüli fémhab zömítés hatékonyságának vizsgálata ezért az összehasonlító vizsgálatot 50 %-os alakváltozásig folytattam.

A fémhab tömb szabad zömítésben, 50 %-os alakváltozás mellett 70,67 J energiát volt képes elnyelni, ami 4,71 J/mm SE értéket jelent. Ezzel szemben a crashbox szerkezet 50 %-os alakváltozásig 424,09 J energia abszorpcióra volt képes 7,85 J/mm SE érték mellett. Ezek alapján kijelenthető, hogy mindenképpen érdemes a fémhabot mint abszorbert crashbox szerkezetekhez használt töltetként és nem önálló energia elnyelő tömbként alkalmazni.

8.8 Különböző típusú fémhabtöltet alkalmazása a 2.sz. konstrukcióban

Ebben a fejezetben a találmány második konstrukciós kivitelének zömítési eredményeit mutatom be a 22. táblázat szerinti SP5 jelzésű próbadarabokat használva. A szerkezet felső és alsó szegmensében eltérő sűrűségű fémhabot használtam. A felső tagban és a középső tag felső részében helyeztem el a kisebb sűrűségű habot, míg az alsó részben a nagyobb sűrűségű változatot. A soros és párhuzamos elrendezésű fémhab vizsgálatoknál kapott eredmények és tapasztalatok alapján azzal a feltételezéssel éltem, hogy az elsőként a felső tag töltet zömítése történik, majd ezt a nagyobb sűrűségű habbal szerelt alsó tagok mozgása követi. Ahogy a SP4 konstrukció zömítési vizsgálatánál tapasztaltam a szerkezet kihajlásra érzékeny ezen geometriai méretek mellett, ezért számítottam a kihajlás problémájára ennél a koncepciónál is. A zömítés a vártaknak megfelelően kezdődött, ugyanis a felső tagok mozgása történt először, vagyis megkezdődött a kisebb sűrűségű töltet zömítése. Azonban ahogy ez a töltet elérte a felkeményedés állapotát, az alsó tagban plasztikus deformáció jelentkezett, amely kihajlással folytatódott, ezért a mérést meg kellett szakítanom. A zömítési folyamatot az 92. ábra szemlélteti, melynek harmadik lépésénél pirossal jelöltem a szerkezet palástján megjelenő plasztikus deformációt. Az ábrasorozat második lépésénél látható, hogy a felső tag mozgása valósult meg először, az alsó tag nagyobb sűrűségű fémhab töltetének zömítése nélkül. A harmadik lépésnél már az figyelhető meg, hogy a felső tagok egymásba csúsztak a benne lévő fémhab elérte a felkeményedési állapotot, amely erőszintet az alsó tag rugalmasságát már meghaladta és megjelent a maradó deformáció. A negyedik lépésben pedig a kihajolt állapotot ábrázoltam. Az ismétlő mérésnél (SP5/2) ugyan ezt a folyamatot tapasztaltam, ezért az 93. ábrát az SP5/1 és SP5/2 méréseknél készített felvételekből állítottam össze.



93. ábra SP5 jelölési próbadarab zömülési folyamata

Mivel a tesztelések során több problémát is tapasztaltam ennél a konstrukciónál ezért erre a koncepcióra vonatkozóan az alábbi megállapításokat kellett tennem.

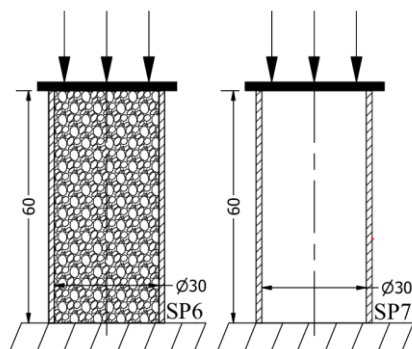
A második konstrukció, ugyan több fémhab töltet egyidejű zömítésére ad lehetőséget, azonban ezzel a szerkezet túl karcsúvá és ezáltal kihajlásra hajlamossá válhat, függetlenül az alkalmazott fémhab töltet típusától. Ezért a hatékonyabb és kiszámítható működés érdekében mindenképpen figyelembe kell venni a szerkezet magasság és átmérő arányát.

Továbbá a tesztelések alapján megfogalmazható, hogy ahhoz, hogy a szerkezet működési mechanizmusa érvényesülni tudjon, összhangba kell hozni, a töltet merevségi jellemzőit a héjszerkezet mechanikai jellemzőivel. A nagyobb sűrűségű fémhab töltettel növelhető a szerkezet energia elnyelő képessége, de olyan feszültségállapotok jöhetnek létre a zömítésük során, amely elérheti a héjszerkezet idő előtti folyáshatárát, szabotálva ezzel a teleszkóp jellegű mozgását a crashboxnak, valamint fokozhatja a kihajlás lehetőségét is.

8.9 Zömítési erő ingadozása

Az abszorberek további minősítéshez és összehasonlításához a zömítés során jelentkező, a gyűrődés szempontjából hátrányos erő ingadozás mértékét kifejező szórás, relatív szórás és ULC jellemzőket használok. A crashbox szerkezetek fejlesztése esetén a cél, az ULC érték alacsonyan való tartása a gyűrődés során, kifejezetten a zömülés plasztikus deformációs szakaszában, hiszen a kisebb ULC érték nagyobb alakváltozási stabilitást jelent. A (23) képlet alapján az ULC egy dimenzió nélküli számérték, amely az elnyelt energia értékét alkalmazza. A szórási és ULC értékek optimalizációjának egyik eszköze a vékonyfalú szerkezetek alakoptimalizációja, ahol alaksajátossággal, pl. kúpossággal vagy gyűrődést segítő bordákkal csökkenthető az erő ingadozás mértéke, amelyet a 7. fejezetben a végeselemes szimuláción keresztül igazoltam.

Az erő ingadozás értékének javítására használható a vékonyfalú szerkezet fémhabbal történő megtöltése is, amely kis mértékben ugyan de, szintén mérsékli a zömítési erő fluktuációját. Ezen állításom igazolásához összehasonlító mérést végeztem, ahol két féle próbatestet használtam, melynek zömítési karakterisztikáit az 95. ábrán hasonlítottam össze a rugalmas deformációt követő plasztikus deformációs (5-50 mm) szakaszra vonatkozóan. A vizsgálathoz $0,68 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű zártcellás alumínium fémhabbal töltött, AW6060 AlMGSi alapanyagból készített 30 mm-es névleges belső átmérőjű, 1 mm falvastagságú próbatestet használtam SP6 jelöléssel, melyet 50 mm-rel zömítettem. A mérést megismételtem ugyan ezen szelvény geometriával immáron fémhab töltet nélkül (SP7), hogy annak zömítési erő ingadozására gyakorolt hatása kifejezhető legyen. Az összehasonlításához használt próbatestek sematikus ábráját az 94. ábra mutatja. A mérés során készített fényképek sorozata az 95. ábrán látható.



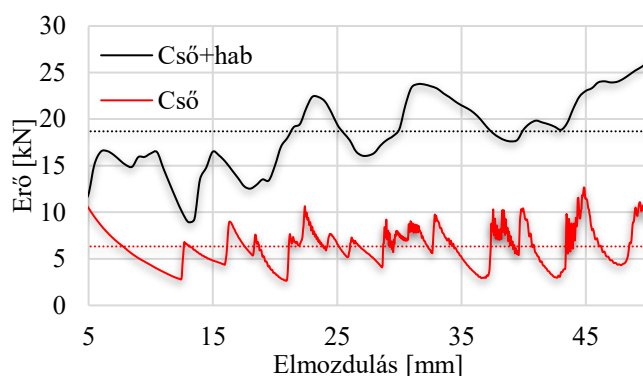
94. ábra A crashbox üres és fémhabbal töltött változata



95. ábra A fémhabbal töltött szelvény (SP6) zömülésének folyamata

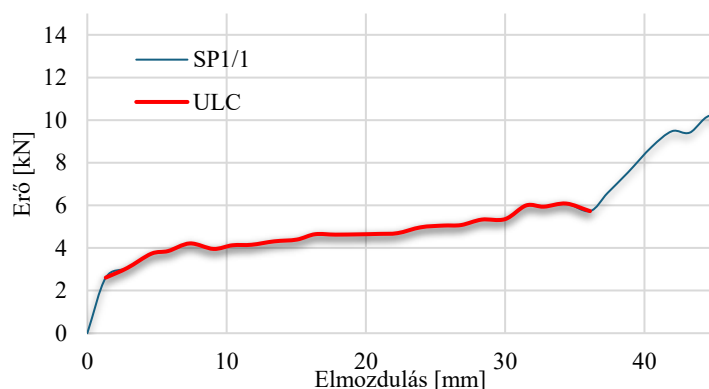
Az 96. ábra grafikonján jól látható, hogy a fémhab töltet egyidejűleg növelte a szelvény alakváltozással szembeni ellenállást és csökkentette a zömítési erő fluktuációját. Az ábrán pirossal jelöltem a töltet nélküli szelvényt, amely zömülése során 2,56 kN szórást mutatott 6,46 kN-os átlagos erő mellett, ez számszerűen 39,76 %-os relatív szórást jelent, az ULC_{5-50} értéke pedig 26 % volt. Ezzel szemben a fémhabbal töltött változat ugyan ezen a szakaszon vett szórás értéke 4,02 kN, miközben az átlagos zömítési erő 18,60 kN volt. Kiszámítva a relatív szórás értékét, ez már csak 21,61 %-os értéket jelent. A kisebb mértékű zömítési erő fluktuációt

az ULC_{5-50} értékével is igazolható, amely számszerűen 17 % volt. Ezek alapján egyértelműen kijelenthető, hogy a fémhab töltet nem csak az elnyelt energia mennyiségét, de az erő fluktuáció mértékét is javította.



96. ábra Fémhab töltet hatása az alakváltozási stabilitásra

Az általam fejlesztett szerkezet egyik előnye, hogy a fémhab töltet zömítése és a héjszerkezet deformációja elkülöníthető, így a zömülés kezdeti szakaszában elkerülhető a jelentős zömítési erő fluktuációja, hiszen érvényesülni tud a töltetként használt alumínium habra jellemző platószakasz. Ezért a szórási és ULC értékeket az SP1 jelölésű szerkezetre vonatkozóan is meghatároztam a fémhab töltet zömítésének periódusában. Ezt a periódust az 97. ábrán piros színnel jelöltem, ahol 0,71 kN-os szórás és 14,7 %-os relatív szórás mellett történt a zömülés. Az ULC értéke pedig 11% volt. Az erő fluktuációval kapcsolatos eredményeket a 24. táblázatban foglaltam össze.



97. ábra AZ SP1 konstrukció zömülésének plató szakasza

24. táblázat Az erő fluktuációra vonatkozó eredmények

	SP1	SP6	SP7
STDEV [kN]	0,76	3,99	2,04
RSD[%]	14,72	21,64	32,51
ULC[-]	0,11	0,17	0,26

8.10 Az optimalizált crashbox szerkezettel kapcsolatban megfogalmazott

következtetések

A kutatásom során végzett mérésekkel igazoltam, hogy a crashbox szerkezetek energia elnyelő képessége fokozható fémhab integrációval, ráadásul az alacsony sűrűségűeknek köszönhetően alkalmazásukkal a tömegoptimalizáció is figyelembe vehető. A tudomány állásában ismert fémhabbal töltött crashbox gyűrődése nem különíti el a töltet és a héjszerkezet zömülését, azok egyidejűleg történnek. Ez viszont azt eredményezi, hogy számolnunk kell az előző fejezetekben ismertetett kezdeti csúcserő problémájával, ami leginkább alak sajátosság függő, másrészt a gyűrődés során jelentkező zömítési erő ingadozásával, ami az ULC értékkel fejezhető ki. Részleges ütközés esetén ráadásul az alkalmazott töltet egy része zömületlen állapotban marad, helyreállítása a teljes szerkezet cseréjét igényli. A teleszkópos kivitelnek köszönhetően azonban a fémhab zömítése és a héjszerkezet gyűrődése elkülöníthető. Elsőként a töltet zömülése történik a rá jellemző előnyös gyűrődési karakterisztika érvényesülése mellett. Amennyiben az ütközési energia nagyobb, mint amit a töltet zömülése képes elnyelni, akkor megkezdődik a héjszerkezet plasztikus deformációja, melynek jellemző falvastagsága immáron az egymásba tolódott tagok falvastagságainak összegével lesz egyenlő. A teleszkóp szerkezet tagjainak működésbe lépése befolyásolható a bennük alkalmazott fémhab sűrűségével. A szerkezeten belül eltérő sűrűségű töltetet használva a teljes energia abszorpció lépcsőzetesen valósul meg. A találmány első és második aspektusát összehasonlítva azt tapasztaltam, hogy mindkét szerkezet a vártaknak megfelelően lépett működésbe, azonban mindenképpen figyelembe kell venni a magasság és átmérő viszonyt a kihajlás problémája miatt. Továbbá fontos összehangolni az alkalmazott fémhab gyűrődési jellemzőit a héjszerkezet folyáshatárával.

A szórási és ULC értékeket meghatározásával igazolható, hogy a fémhab töltet nem csak növeli a crashbox szerkezet energia elnyelő képességét, hanem a zömítési stabilitására is jótékony hatással van. A szelvény gyűrődési stabilitása 35 %-al javult a fémhab töltetnek köszönhetően. Az erő ingadozásokkal végzett számítások során arra a megállapításra jutottam, hogy a szórási és ULC érték már a felkeményedési fázisra nem érvényesíthető, hiszen az kapott értékek már nem relevánsak a meredeken emelkedő karakterisztikára.

A konstrukció P2400387 ügyszámon szabadalmi nyilvántartásba került, ahol az újdonság kutatási jelentés minden igénypont tekintetében elismerte az újdonságot, a feltalálói tevékenységet, valamint a termék ipari alkalmazhatóságát is.

8.11 Tézis

Fejlesztettem egy olyan - lökhárító és aláfutásgátló rendszerekben alkalmazható - abszorberrel töltött, több tagú-crashbox konstrukciót, amelynek az ütközés során jelentkező egységnyi deformációja a szerkezet belsejében két egységnyi abszorber zömülést hoz létre, növelve ezzel a szerkezet és ezáltal a jármű ütközésbiztonsági teljesítményét. Ezt az eddig energia elnyelőknél nem alkalmazott működési mechanizmust a deformáció áttétel fogalmával definiáltam.

Méréssel igazoltam, hogy az általam tervezett fémhabbal töltött szerkezet 66%-al több energiát képes elnyelni egységnyi elmozdulásra számítva, mint a tömbösített fémhabból kialakított abszorber, miközben a energia abszorpció/tömeg arány értéke is javult. Azonos geometriájú és dimenziójú, fémhabbal töltött crashbox szerkezethez viszonyítva a plasztikus deformációra jutó elnyelt energia hányad értéke 34,5 %-al nagyobb, miközben az alakváltozási stabilitás tekintetében is 35,3 %-os javulást értem el.

A mérésekkel igazoltam, hogy a szerkezet működésének köszönhetően a töltet és a héjszerkezet zömítése elkülöníthető, így a hagyományos vékonyfalú szerkezetekre jellemző kezdeti csúcserő és erő ingadozási probléma nem jelentkezik, vagyis függetleníthető a keresztmetszeti jellemzőktől. Ráadásul részleges zömítés esetén a fémhab töltet cserélhető, nem szükséges a teljes szerkezet cseréje [KJ126], [KJ127], [KJ133].

9. Összegzett következtetések, összefoglalás

A dolgozatom a ráfutásos balesetek statisztikájával és jellemzőinek bemutatásával kezdődik. A statisztikák azt igazolják, hogy ezen baleset típus jelentős része alacsony ütközési sebesség mellett történik. A lökhárító és annak tartozékai plasztikus deformáció révén nyelik el az ütközési energiát, csökkentve ezzel a járműben utazók - lassulás okozta – terhelés mértékét. Az ütközés prevenciót szolgáló aktív biztonsági technikai újítások ellenére számos ráfutásos baleset történik, amelynek legfőbb oka a közutak drasztikusan növekvő forgalma. Ezek alapján kijelenthető, hogy szükség van a passzív biztonsági rendszerek fejlesztésére [KJ127], [KJ131], [KJ126].

A disszertáció folytatásaként részletezem a lökhárító rendszerek felépítését, és gyűrődési jellemzőit, valamint azokat a mérőszámokat amelyek alkalmasak az energia elnyelő szerkezetek jellemzésére. Bemutatok néhány – a dolgozatom szempontjából – releváns tanulmányt, amelyek gondolatébresztőként szolgáltak a kutatásom elején, és betekintést adnak a tudomány mai állásába, annak hiányosságaiba és további kiaknázatlan kutatási területekbe.

A kutatásom fő fókusz területe a lökhárító rendszer részét képező crashbox szerkezet konstrukciós fejlesztése fémhab integrációval, ezért a dolgozat soron következő fejezete ezen fémhabok bemutatását és azok jellemző mechanikai vizsgálatát írja le. Ebben a fejezetben szintén kitekintést teszek a fémhabok mechanikai vizsgálatára vonatkozó nemzetközi kutatásokra és azok eredményeire, hiányosságaira.

A radiálisan gátolt zömítés egy gyakran alkalmazott fémhab vizsgálati módszer, amelyben fontos szerepet játszik a fémhab és a kényszer között ébredő Coulomb-féle száraz súrlódás. A vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy a radiálisan gátolt zömítéshez nagyobb mértékű energia befektetés szükséges ugyan azon típusú hab, ugyan olyan mértékű deformációjához, egy szabad zömítéshez viszonyítva. Méréssel meghatároztam, hogy a radiálisan gátolt zömítés során jelentkező mechanikai energia abszorpció többlett egy jelentős részét – átlagosan 20,79%-át – a cső belső felülete és a fémhab között ébredő súrlódási ellenállás okozza. Ezt követően ismertetem, hogy a súrlódási ellenállás mértékét a fémhab és a cső fala között ébredő súrlódási együttható, valamint a fémhab porozitása és a kontaktmechanizmus határozza meg. Az elvégzett méréseimet részletezve igazolom, hogy a belső zömítésű, fémhabbal töltött crashbox szerkezetek energia abszorpciós képessége, és ezáltal ütközésbiztonsági hatásfokuk növelhető a súrlódási paraméterek növelésével, ami tömegoptimalizációs követelmények szempontjából fontos megállapítás [KJ126], [KJ127].

A súrlódási ellenállásáról szóló fejezetet követően bemutatom a fémhabok zömítésénél használatos soros és párhuzamos elrendezés definícióját, majd az ezzel kapcsolatosan elvégzett mérés eredményeit. A vizsgálattal igazolhatóvá vált, hogy a fémhabok energia elnyelő képessége nem csak a porozitásától függ, hanem a különböző sűrűségű egyidejűleg zömített változatok egymáshoz viszonyított helyzetétől és a zömítés sorrendjétől is [KJ123].

A passzívbiztonsági karosszéria elemek kutatásában jelentős segítséget nyújt a véges elemes analízis, hiszen a kezdeti koncepciók költséghatékonyan vizsgálhatók és optimalizálhatók. 12 féle konstrukció VEM vizsgálatával folytatom a dolgozatomat, amelyben bemutatom azokat a konstrukciós megoldásokat, amelyekkel optimalizálható a crashbox szerkezetek gyűrődési jellemzői.

A disszertáció utolsó fejezetében bemutatok egy olyan általam fejlesztett több tagú crashbox konstrukciót, amely a radiálisan gátolt zömítés elvén működik és megoldást jelent a hagyományos vékonyfalú szerkezetekre jellemző kezdeti csúcserő problémára. A fejezet a technika állásának ismertetésével kezdődik, majd a fejlesztett konstrukció szerkezeti és működési mechanizmusának bemutatásával folytatódik. Az elméleti működést laboratóriumi zömítő vizsgálatokkal igazolom, hatékonyságát más abszorberekkel összehasonlítva

jellemzem. A szerkezet felépítésnek köszönhetően az egységnyi hossz változás a belső fémhab tölteten két egységnyi zömítési elmozdulást jelent. Ezt az eddig energia elnyelőknél nem alkalmazott működési mechanizmust a deformáció áttétel fogalmával definiálom.

Végül bemutatom azt a mérést, amivel igazolom, hogy az általam tervezett fémhabbal töltött szerkezet 66%-al több energiát képes elnyelni egységnyi elmozdulásra számítva, mint a tömbösített fémhabból kialakított abszorber, miközben a energia abszorpció/tömeg arány értéke is javult.

9.1 Új tudományos eredmények

Az általam végzett, jelen értekezésben bemutatott – a lökhárító és aláfutásgátló rendszerekben alkalmazható crashbox szerkezetekre vonatkozó – kutatásom és fejlesztői munkám új tudományos eredményeit az alábbi tézispontokban fogalmazom meg.

Az első hipotézisem megfogalmazásában feltételeztem, hogy 0,4 és 0,7 g/cm³ sűrűségű, zártcellás alumínium fémhab radiálisan gátolt, AW6060 alumínium csövön belüli zömítéséhez szignifikánsan több mechanikai energiára van szükség szabad zömítésükhöz képest. Továbbá valószínűsítettem, hogy a radiálisan gátolt zömítés során jelentkező mechanikai energia abszorpció többlet egy jelentős részét a cső belső felülete és a fémhab között ébredő súrlódási ellenállás okozza, vagyis a zömítés alkalmával a súrlódási ellenállás leküzdésére fordítódik. Mindemellett feltételeztem, hogy a súrlódási ellenállás mértékét a fémhab és a cső fala között ébredő súrlódási együttható, valamint a fémhab porozitása és a kontaktmechanizmus határozza meg.

1. tézis: Laboratóriumi méréssel igazoltam, hogy zártcellás 0,4 és 0,7 g/cm³ sűrűségű alumínium fémhabok radiálisan gátolt zömítéséhez - átlagosan 53,6 % - al több mechanikai energiára van szükség szabad zömítésükhöz képest. Méréssel meghatároztam, hogy a radiálisan gátolt zömítés során jelentkező mechanikai energia abszorpció többlet egy jelentős részét – átlagosan 20,79 %-át – a cső belső felülete és a fémhab között ébredő súrlódási ellenállás okozza. A mérések eredményei alapján megállapítottam, hogy a súrlódási ellenállás mértékét a fémhab és a cső fala között ébredő súrlódási együttható, valamint a fémhab porozitása és a kontaktmechanizmus határozza meg. Az elvégzett mérések igazolták, hogy a belső zömítésű, fémhabbal töltött crashbox szerkezetek energia abszorpciós képessége, és ezáltal ütközésbiztonsági hatásfokuk növelhető a súrlódási paraméterek növelésével, ez azt jelenti, hogy tömegnövelés nélkül is fokozható egy gyűrődő elem energia elnyelő képessége [KJ118], [KJ125], [KJ126], [KJ127].

Második hipotézisemben feltételeztem, hogy a passzívbiztonsági szerkezetekben energia elnyelőként használt alumínium fémhabok energia abszorpciós képességét nem csak azok mechanikai paraméterei, hanem egymáshoz viszonyított helyzete és a zömítés relatív sorrendje is nagymértékben befolyásolja.

2. tézis: Definiáltam a soros és párhuzamos zömítés fogalmát zártcellás alumínium fémhabok szabad zömítésére vonatkozóan. Soros elrendezés esetében a két különböző sűrűségű (0,4 és 0,7 g/cm³) zártcellás fémhabból készült próbatesteket egymásra, a párhuzamos elrendezés esetén pedig közvetlenül egymás mellé helyezzük. A párhuzamos elrendezésű konstrukció 21,5 %-al több energiát képes elnyelni, az alacsonyabb és nagyobb sűrűségű hab egyenként mért abszorpciós értékének matematikai összegéhez képest. A soros elrendezés előnye, hogy - az energia abszorpció tekintetében kiemelt fontosságú - plató szakasz átlagosan 40%-al hosszabb lefutású, amely a plasztikus deformációra jutó elnyelt energia hányad (CP) értékével is igazolható, hiszen ezen elrendezés esetén ennek értéke 22 %-al nőtt. A soros és párhuzamos elrendezések passzívbiztonsági karosszéria elemekben alkalmazva, alkalmas a biztonság fokozására, nagyobb energia abszorpciós képességük, és a soros elrendezés adta kétlépcsős plató szakasz révén. [KJ122], [KJ123].

Harmadik hipotézisemben azt feltételeztem, hogy alumínium ötvözetből készített különböző keresztmetszetű crashbox szerkezetek plasztikus deformációjához (kezdeti csúcserő) szükséges zömítő erő mértéke csökkenthető kúpszög alkalmazásával, és a paláston alkalmazott törésindító, bordázat használatával, anélkül, hogy jelentősen csökkenne az energia abszorpciós képessége.

3. tézis: Végeselemes-analízissel igazoltam, hogy az EN AW 6082 AlSi1MgMn alumínium ötvözetből készített téglalap és nyolcszög keresztmetszetű crashbox szerkezetek plasztikus deformációjához (kezdeti csúcserő) szükséges zömítő erő mértéke 35 %-al csökkenthető 20 %-os kúpszög alkalmazásával, és a paláston alkalmazott három darab törésindító, negatív típusú bordázat használatával. Ezzel az alakoptimalizációval egy hagyományos, a gyakorlatban gyakran is alkalmazott téglalap keresztmetszetű crashbox gyűrődési hatásfoka (CFE) 43 %-al, míg a nyolcszögletű koncepció CFE-értéke 36 %-al növelhető, miközben a tömegoptimalizáció szempontjából fontos, egységnyi térfogatra és egységnyi tömegre vonatkoztatott elnyelt energia értéke is javul [KJ121], [KJ122].

Negyedik hipotézisemben feltételeztem, hogy linearitás áll fenn alumínium ötvözetből készített crashbox-ok szerkezeti merevségi értéke és a próbatesten alkalmazott gyűrődést segítő kúpszög értéke között.

4. tézis: Iterációs módszerrel meghatároztam, hogy az EN AW 6082 AlSi1MgMn alumínium ötvözetből készített crashbox-ok zömítési vizsgálattal meghatározott szerkezeti merevségi értéke és a próbatesten alkalmazott gyűrődést segítő kúpszög értéke között lineáris összefüggés áll fenn [KJ121].

Ötödik hipotézisemben feltételeztem, hogy konstrukciós optimalizációval fejleszthető olyan fémhabbal integrált crashbox szerkezet, ami több energiát képes elnyelni egységnyi elmozdulásra számítva, mint a tömbösített fémhabból kialakított abszorber, miközben az energia abszorpció/tömeg arány értéke is javítható. Ezen kívül feltételeztem, hogy egy teleszkópos működési mechanizmussal az adott crashbox alakváltozási stabilitása javítható, a kezdeti csúcserő értéke pedig függetleníthető a keresztmetszet típusától és a falvastagság értékétől.

5. tézis: Fejlesztettem egy olyan - lökhárító és aláfutásgátló rendszerekben alkalmazható - abszorberrel töltött, több tagú-crashbox konstrukciót, amelynek az ütközés során jelentkező egységnyi deformációja a szerkezet belsejében két egységnyi abszorber zömülést hoz létre, növelve ezzel a szerkezet és ezáltal a jármű ütközésbiztonsági teljesítményét. Ezt az eddigi energia elnyelőknél nem alkalmazott működési mechanizmust a deformáció áttétel fogalmával definiáltam.

Méréssel igazoltam, hogy az általam tervezett fémhabbal töltött szerkezet 66%-al több energiát képes elnyelni egységnyi elmozdulásra számítva, mint a tömbösített fémhabból kialakított abszorber, miközben a energia abszorpció/tömeg arány értéke is javult. Azonos geometriájú és dimenziójú, fémhabbal töltött crashbox szerkezethez viszonyítva a plasztikus deformációra jutó elnyelt energia hányad értéke 34,5 %-al nagyobb, miközben az alakváltozási stabilitás tekintetében 35,3 %-os javulást értem el.

A mérésekkel igazoltam, hogy a szerkezet működésének köszönhetően a töltet és a héjszerkezet zömítése elkülöníthető, így a hagyományos vékonyfalú szerkezetekre jellemző kezdeti csúcserő és erő ingadozási probléma nem jelentkezik, vagyis függetleníthető a keresztmetszeti jellemzőktől. Ráadásul részleges zömítés esetén a fémhab töltet cserélhető, nem szükséges a teljes szerkezet cseréje [KJ126], [KJ127], [KJ133].

9.1.1 Tudományos eredmények hasznosítása, ajánlás

9.2 Tudományos eredmények hasznosítása, ajánlás

A disszertációmban bemutatott eredmények széles tudománykörben hasznosíthatók, hiszen több tématerületet érint. A kutatás első felében bemutatott zártcellás fémhabokkal végzett laboratóriumi mérések eredményei hasznosak lehetnek nem csak az ütközésbiztonsággal foglalkozó kutatók számára, de értékes információt adhat más pl. anyagtudományban végzett kutatásokhoz. A kutatásom eredményei elsősorban járműipari vonatúak, de azok hasznosíthatók csomagolás technikában és objektum törésvédelemben is. A végeselemes analízis eredményei hasznosíthatók alakoptimalizációval foglalkozó jármű ipari kutatásokhoz, valamint gondolatébresztőként szolgálhatnak lökhárító és aláfutásgátló rendszerek fejlesztésénél. A disszertációban megfogalmazott gondolatokat és eredményeket ajánlom a közlekedésbiztonság területén dolgozó kutatóknak és mérnököknek. Az általam fejlesztett crashbox konstrukció hasznosítható személygépjárművek lökhárító rendszereinél, valamint személy- és teherszállító járművek aláfutásgátló rendszereinek optimalizációjához, ezért munkámat ajánlom gépjármű gyártói fejlesztői csoportoknak.

9.3 Jövőbeli tervek

Jövőbeli terveim között szerepel a több tagú crashbox szerkezet dinamikai vizsgálata, valamint más abszorber töltettel történő (pl. kompozitok, lattice szerkezetek) optimalizációja. Továbbá célom, járműre szerelt állapotban, valós töréstesztet által meggyőződni a szerkezet hatékonyságáról. A fémhabok radiálisan gátolt zömítése során jelentkező száraz súrlódásra vonatkozó vizsgálataimat szeretném azzal kibővíteni és folytatni, hogy különböző felületi érdességeket hozok létre a kontakt felületek mentén, hogy további összefüggést tudjak megállapítani a súrlódás és az energia abszorpció között. A fémhab vizsgálatok során kapott eredményeket az oldalütközések biztonságának fokozása céljából szeretném konstrukciós szempontból hasznosítani. A végeselemes analízis adta konstrukciós optimalizáció eredményeit a lökhárító rendszert követő passzívbiztonsági gyűrődő zónára, vagyis a jármű nyúlványaira is szeretném alkalmazni. Jövőbeli tervem ipari partnert találni a szabadalmi bejelentés tárgyát képező konstrukció hasznosításához, tovább fejlesztéséhez, valamint az elmúlt években megszerzett tapasztalat és információ átadása egyetemi hallgatóknak oktatás keretében.

9.4 Elért eredmények és következtetések angol nyelvű összefoglalója

The present section encloses the main usable results of the research work, besides the conclusions listing the defined thesis. In formulating my first hypothesis, I assumed that

significantly more mechanical energy is required for the compression of closed-cell aluminium metal foam with a relative density between 0.15 and 0.26 inside a radially constrained AW6060 aluminium tube, compared to their free (unconstrained) compression. Furthermore, I hypothesised that a significant portion of the additional mechanical energy absorption occurring during radially constrained compression is caused by the frictional resistance arising between the inner surface of the tube and the metal foam. In other words, during compression, a substantial amount of energy is spent overcoming this frictional resistance.

As a result of the execution of experimental measurement, it can be stated that a significant part of the mechanical energy absorption during radially inhibited compression is caused by the frictional resistance arising between the inner surface of the pipe and the metal foam, on average 20.79%. Numerically, this proportion is 16.62% (8.69 J) for the metal foam with a relative density of 0.15, while it is 24.96% (56.17 J) for the metal foam with a relative density of 0.26. I have proven that 10% of the mechanical energy absorbed during radially inhibited compression of closed-cell metal foams is used to overcome the frictional resistance. Based on these results, it can be expressed that the energy absorbing capacity of an absorber structure as a part of the passive safety crumple zone could be improved by modifying the friction conditions between the components. In addition, it has been able to prove that the energy absorption of a closed-cell aluminium foam does not depend only on the porosity and mechanical features, but also on the relative position to each other during the compression procedure. First of all, I had to define the parallel and serial concept terminology, since this kind of measurement process had not been executed before. The parallel means the foam specimens with deviated density are located next to each other, whilst in the case of serial, they are mounted onto each other. The parallel arrangement can absorb 21.5% more energy than the mathematical sum of the absorption values of the lower and higher density foams measured individually. The advantage of the in-line arrangement is that the plateau phase, which is characteristic of closed-cell metal foams and is of particular importance in terms of energy absorption, takes longer. Numerically, the hardening of the in-line metal foam construction begins later, at an average nominal deformation of 77%, compared to the 50-60% deformation values of the components measured individually. This can also be supported by the CP value, since in the case of the in-line arrangement, the amount of absorbed energy per plastic deformation increased by 22%. The results and experiments given by this experimental research can be implemented and utilised in the development of a multisegment crashbox structure.

In the third part of my research, I have investigated the effect of crash initiators on the energy-absorbing and crumpling behaviour of thin-walled structures using Finite Element Analysis. During the research, the manufacturability and feasibility of the product were crucial requirements; therefore, the conic shape and negative type notches were applied as a crash initiator. The FEA models and analysis procedure have been validated by experimental crumpling tests. I have verified by finite element analysis that the compressive force required for plastic deformation (initial peak force) of rectangular and octagonal cross-section crashbox structures made of EN AW 6082 AlSi1MgMn aluminium alloy can be reduced by 35% by using a 20% taper angle and three fracture-initiating, negative-type ribs on the shell.

In the fourth segment, an advanced multi-stage telescopic crashbox is presented, developed by me using the experiences coming from the above-mentioned experimental procedure. I have developed a multi-member crashbox construction filled with absorbers, which can be used in bumper and underrun protection systems. A unit of deformation during a collision generates two units of absorber compression inside the structure, thus increasing the crash safety performance of the structure and the vehicle. I defined this operating mechanism, which has not been used in energy absorbers before, with the concept of deformation ratio. I have verified with the measurements that thanks to the operation of the structure, the compression of the filling and the shell structure can be separated, so the initial peak force and force fluctuation problem typical of traditional thin-walled structures does not occur, i.e. it can be made independent of the cross-sectional characteristics. Moreover, in the case of partial compression, the metal foam filling can be replaced; it is not necessary to replace the entire structure. The construction was registered under patent number P2400387, and based on the novelty research report, the novelty and industrial applicability of the product were verified.

Felhasznált irodalom

- [1] ACEA (European Automobile Manufacturers' Association) – *Vehicles in use in Europe 2023* report, **2023** <https://www.acea.auto/files/ACEA-report-vehicles-in-use-europe-2023.pdf> (Letöltve: 2024.07.17.)
- [2] Dr. Tettamanti Tamás, Dr. Varga István - Közúti forgalomtechnikai paraméterek mérése és becslése, Egyetemi jegyzet – Széchenyi István Egyetem, https://jem.sze.hu/images/Dok/Kozuti_forgalomtechnikai_parameterek_merese_es_becslese.pdf (Letöltve : 2024.07.17.)
- [3] Paleti, R., Eluru, N., & Bhat, C. R. (2010). Examining the influence of aggressive driving behaviour on driver injury severity in traffic crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 42(6), 1839-1854.
- [4] Wang, J., Xu, W., Fu, T., Gong, H., Shangguan, Q., & Sobhani, A. (2022). Modelling aggressive driving behaviour based on graph construction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 138, 103654.

- [5] Yu, D., Wu, Y., & Yang, N. (2016, March). Influence of aggressive driving behaviour on the traffic flow character in following flow. In *2016 Eighth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)* (pp. 339-346). IEEE.
- [6] Zhang, L., Zhang, S., Zhou, B., Jiao, S., & Huang, Y. (2021). An Improved Car-Following Model considering Desired Safety Distance and Heterogeneity of Drivers' Sensitivity. *Journal of Advanced Transportation*, 2021(1), 6693433.
- [7] Magyar Közút - Közúti közlekedési balesetek statisztikai adatai, 2024, <https://www.kozut.hu/download/kozuti-kozlekedesi-balesetek-statisztikai-adatai/> (Letöltve : 2024.07.17.)
- [8] Malin, F., Norros, I., & Innamaa, S. (2019). The accident risk of road and weather conditions on different road types. *Accident Analysis & Prevention*, 122, 181-188.
- [9] KSH (Központi Statisztikai Hivatal) – Közúti gépjármű állomány Magyarországon https://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_ode006b.html (Letöltve:2024.07.18.)
- [10] Luo, G., Xue, P., & Sun, S. (2018). Investigations on the yield behaviour of metal foam under multiaxial loadings by an image-based mesoscopic model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 142, 153-162.
- [11] Gioux, G., McCormack, T. M., & Gibson, L. J. (2000). Failure of aluminium foams under multiaxial loads. *International Journal of Mechanical Sciences*, 42(6), 1097-1117.
- [12] Szlancsik, A. (2021). Szintaktikus fémhabok rugalmas, és nyomóvizsgálatokkal meghatározható képlékeny tulajdonságai és modellezése (Doctoral dissertation, Budapest University of Technology and Economics (Hungary)).
- [13] 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.
- [14] Li C, Li C, Wang Y, Compressive behaviour and energy absorption capacity of unconstrained and constrained open-cell aluminium foams, *Advanced Composites Letters* 29 (2020) 1-4
- [15] –Benouali, A. H., Froyen, L., Delerue, J. F., & Wevers, M. (2002). Mechanical analysis and microstructural characterisation of metal foams. *Materials science and technology*, 18(5), 489-494.
- [16] –Mankovits, T., Budai, I., Balogh, G., Gábora, A., Kozma, I., Varga, T., ... & Kocsis, I. (2014). Structural analysis and its statistical evaluation of a closed-cell metal foam. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 5(2), 135-143.
- [17] –Toan Thang, P., Nguyen-Thoi, T., & Lee, J. (2020). Mechanical stability of metal foam cylindrical shells with various porosity distributions. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 27(4), 295-303.
- [18] –Papadopoulos, D. P., Konstantinidis, I. C., Papanastasiou, N., Skolianos, S., Lefakis, H., & Tsipas, D. N. (2004). Mechanical properties of Al metal foams. *Materials letters*, 58(21), 2574-2578.
- [19] –Rayamajhi, M., Hunkeler, S., & Duddeck, F. (2014). Geometrical compatibility in structural shape optimisation for crashworthiness. *International Journal of Crashworthiness*, 19(1), 42-56.
- [20] –Perdana, M. A. P., Hapid, A., Muharam, A., Kaleb, S., Ristiana, R., & Budiman, A. C. (2023). Crashworthiness Enhancement: The Optimization of Vehicle Crash Box Performance by Utilizing Bionic-Albuca Spiralis Thin-Walled Structure.
- [21] KSH (Központi Statisztikai Hivatal) – Személyesüléses közúti közlekedési balesetek <https://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/stattukor/bal/bal1909m.pdf> (Letöltve : 2024.07.23.)

- [22] Miley Legal – Accident Injury Lawyers: The Most Common Injuries From Rear-End Collisions, <https://mileylegal.com/rear-end-collision-injuries/> (Letöltve: 2024.07.23.)
- [23] Wang, C., Chen, F., Zhang, Y., & Cheng, J. (2023). Analysis of injury severity in rear-end crashes on an expressway involving different types of vehicles using random-parameters logit models with heterogeneity in means and variances. *Transportation letters*, 15(7), 742-753.
- [24] Balcerak, J. C., Williams, J. S., Morris, A. T., Babcock, W., Polvino, R., Riger, P., & Dawley, R. E. (1972). Injury frequency and head restraint effectiveness in rear-end impact accidents (No. 720967). SAE Technical Paper.
- [25] Stigson, H., Ydenius, A., & Kullgren, A. (2006, September). Variation of crash severity and injury risk depending on collisions with different vehicle types and objects. In 2006, the International IRCOBI conference on the biomechanics of impact, Madrid, Spain (pp. 20-22).
- [26] Markogiannakis, H., Sanidas, E., Messaris, E., Koutentakis, D., Alpantaki, K., Kafetzakis, A., & Tsiftsis, D. (2006). Motor vehicle trauma: analysis of injury profiles by road-user category. *Emergency medicine journal*, 23(1), 27-31.
- [27] Bono, G., Antonaci, F., Ghirmai, S., D'Angelo, F., Berger, M., & Nappi, G. (2000). Whiplash injuries: clinical picture and diagnostic work-up. *Clinical and experimental rheumatology*, 18(2; SUPP/19), S-23.
- [28] Ratliff, A. H. C. (1997). Whiplash injuries. *The Journal of Bone & Joint Surgery British Volume*, 79(4), 517-519.
- [29] Linder, A., Avery, M., Krafft, M., & Kullgren, A. (2003). Change of velocity and pulse characteristics in rear impacts: real-world and vehicle test data. Paper No. 285
- [30] Linder, A., Avery, M., Krafft, M., Kullgren, A., & Svensson, M. Y. (2001). *Acceleration pulses and crash severity in low velocity rear impacts—real world data and barrier tests* (No. 2001-06-0253). SAE Technical Paper.
- [31] McCleery, C. H., Limousis-Gayda, M., Rubio, E., Sie, M., & Hashish, R. (2022). The effect of Rear-End collisions on triaxial acceleration to occupant cervical and lumbar Spines: An analysis of IIHS data. *Accident Analysis & Prevention*, 174, 106761.
- [32] Luo, Q., Chen, X., Yuan, J., Zang, X., Yang, J., & Chen, J. (2020). Study and Simulation Analysis of Vehicle Rear-End Collision Model considering Driver Types. *Journal of Advanced Transportation*, 2020(1), 7878656.
- [33] Linder, A., Avery, M., Krafft, M., Kullgren, A., & Svensson, M. Y. (2001). *Acceleration pulses and crash severity in low velocity rear impacts—real world data and barrier tests* (No. 2001-06-0253). SAE Technical Paper.
- [34] Jaspers, J. P. (1998). Whiplash and post-traumatic stress disorder. *Disability and rehabilitation*, 20(11), 397-404.
- [35] Hutchinson, J., Kaiser, M. J., & Lankarani, H. M. (1998). The head injury criterion (HIC) functional. *Applied mathematics and computation*, 96(1), 1-16.
- [36] Henn, H. W. (1998). Crash tests and the head injury criterion. *Teaching mathematics and its applications*, 17(4), 162-170.
- [37] Wilde, K., Tilsen, A., Burzyński, S., & Witkowski, W. (2019). On estimation of occupant safety in vehicular crashes into roadside obstacles using non-linear dynamic analysis. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 285, p. 00022). EDP Sciences.
- [38] Walder, A. D., Yeoman, P. M., & Turnbull, A. (1995). The abbreviated injury scale as a predictor of the outcome of severe head injury. *Intensive care medicine*, 21, 606-609.
- [39] IIHS - Moderate Overlap Frontal Crashworthiness Evaluation Guidelines for Rating Injury Measures, 2014 September,

- [40] Karapetkov, S., Dimitrov, L., Uzunov, H., & Dechkova, S. (2019). Identifying the vehicle and collision impact by applying the principle of conservation of mechanical energy. *Transport and Telecommunication Journal*, 20(3), 191-204.
- [41] Miskolci Egyetem – Fizika, egyetemi jegyzet https://web.uni-miskolc.hu/~www_fiz/pszota/Fizika_I_lev_Ozd/EA01.pdf (Letöltve : 2024.07.23.)
- [42] Berta Miklós, Farzan Ruszlán, Giczi Ferenc, Horváth András – Fizika mérnököknek, egyetemi jegyzet, Széchenyi István Egyetem, 2006
- [43] Kádár Lehel, Dr. Varga Ferenc, Kőfalusi Pál – Közúti járműrendszerek szerkezetana, BME MOGI, 2014
- [44] Tamny, S. (1992). The linear elastic-plastic vehicle collision (No. 921073). SAE Technical Paper.
- [45] ECF-European Cyclists' Federation - Passenger cars: Vehicle mass in running order by brand, <https://ecf.com/news-and-events/news/eus-motor-vehicles-need-go-diet> (Letöltve: 2024.07.31.)
- [46] Żuchowski, A. (2016). Analysis of the influence of the impact speed on the risk of injury of the driver and front passenger of a passenger car. *Eksploatacja i Niezawodność*, 18(3), 436-444.
- [47] Taylor, T. J. (2014). New generation advanced high-strength steels for automotive hot stamping technologies. Swansea University (United Kingdom).
- [48] Kőfalusi Pál, Dr. Antal Ákos, Dr. Varga, Ferenc, Kádár Lehel, Dr. Fodor, Dénes – Járműfedélzeti elektronika, BME MOGI, 2014
- [49] –Mario Boreanaz - Development of crash box for automotive application, FCA-Fiat Chrysler Automobile, 2018
- [50] King, D. J., Siegmund, G. P., & Bailey, M. N. (1993). Automobile bumper behaviour in low-speed impacts (No. 930211). SAE Technical Paper.
- [51] UN ECE R42 regulation, <https://unece.org/transport/documents/2021/02/standards/un-regulation-no-42-amend2> (Letöltve : 2024.08.30.)
- [52] IIHS (Insurance Institute for Highway Safety – Bumper Test Protocol (Version VI), April 2007, 1005 N. Glebe Road, Arlington, VA 22201
- [53] Nagwanshi, D. K., & Kulkarni, S. C. (2009). Lightweight Solitary Beam Design to meet low-speed vehicle damageability and RCAR impact requirements (No. 2009-26-0007). SAE Technical Paper.
- [54] Research Council for Automobile Repairs - Information on the implementation of RCAR crash standards in the German insurance vehicle rating system and information on AEB systems, AZT (RCAR) Bumper Test Front/ Rear, 2013 https://www.rcar.org/Papers/Procedures/CrashStandards_GermanRatingSystem.pdf (Letöltve: 2024.07.24.)
- [55] Farkas, L., Moens, D., Donders, S., & Vandepitte, D. (2012). Optimisation study of a vehicle bumper subsystem with fuzzy parameters. *Mechanical systems and signal processing*, 32, 59-68.
- [56] Per Emil Back - Deformation Behaviour of an Energy Absorber, Luleå University of Technology, 2010:037 CIV - ISSN: 1402-1617 - ISRN: LTU-EX--10/037--SE
- [57] Yusof, N. S. B., Sapuan, S. M., Sultan, M. T. H., Jawaid, M., & Maleque, M. A. (2017). Design and materials development of automotive crash box: a review. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 29(3), 129-144.
- [58] Abdullah, N. A. Z., Sani, M. S. M., Salwani, M. S., & Husain, N. A. (2020). A review on crashworthiness studies of the crash box structure. *Thin-Walled Structures*, 153, 106795.
- [59] Liu, Y., & Ding, L. (2016). A study of using different crash box types in automobile frontal collisions. *Int. J. Simulation: System, Science and Technology*, 17(38), 21-1.

- [60] Sarmah, A., & Mukhopadhyay, J. Crashworthiness of Automobile Components Made from Aluminium Alloys.
- [61] 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.
- [62] Sorokin, A. E., Bulychev, S. N., & Gorbachev, S. I. (2021). Environmental impact of polymer composites. *Russian Engineering Research*, 41, 53-55.
- [63] Ma, Q., Zha, Y., Dong, B., & Gan, X. (2020). Structure design and multiobjective optimization of CFRP/aluminum hybrid crash box. *Polymer Composites*, 41(10), 4202-4220.
- [64] Borse, A., Gulakala, R., & Stoffel, M. (2023). Machine learning enhanced optimisation of crash box design for crashworthiness analysis. *PAMM*, 23(4), e202300145.
- [65] Ristiana, R., Mardiaty, R., Kaleg, S., Hapid, A., Muharam, A., Perdana, M. A. P., & Budiman, A. C. (2023, October). Machine Learning-Based Crashworthiness Optimization of Crash Box Geometry by Adding Corner Shape Reinforcement Variations. In *2023 17th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)* (pp. 1-6). IEEE.
- [66] Borse, A., Gulakala, R., & Stoffel, M. (2024). Development of a machine learning-based design optimisation method for crashworthiness analysis. *Archives of Mechanics*, 76.
- [67] Warsiyanto, B. A. (2021). The Effect of Cross-section and Elliptical Hole Ratio on Crashworthiness Parameters of Crash-Box Structure. *Jurnal Teknologi Dirgantara*, 19(1), 1-14.
- [68] Abdullah, N. A. Z., Sani, M. S. M., Salwani, M. S., & Husain, N. A. (2020). A review on crashworthiness studies of the crash box structure. *Thin-Walled Structures*, 153, 106795.
- [69] Ma, Q., Zha, Y., Dong, B., & Gan, X. (2020). Structure design and multiobjective optimisation of CFRP/aluminium hybrid crash box. *Polymer Composites*, 41(10), 4202-4220.
- [70] Wu, X., Zhang, S., & Shao, J. (2018). *Studies on the impact performance of the gradient lattice structure applied to the crash box* (No. 2018-01-0119). SAE Technical Paper.
- [71] Fuganti, A., Lorenzi, L., Grønsund, A., & Langseth, M. (2000). Aluminium foam for automotive applications. *Advanced Engineering Materials*, 2(4), 200-204.
- [72] Marzbanrad, J. A. V. A. D., & Keshavarzi, A. (2014). A Numerical and experimental study on the crash behaviour of the extruded aluminium crash box with elastic support. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11, 1329-1348.
- [73] Bilmez, S. A., & Taşdemirci, A. (2024, March). Experimental and Numerical Investigation of Energy Absorption Characteristics of a E-Glass/Epoxy Crash Box. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2725, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.
- [74] Dr. Égert János, Dr. Nagy Zoltán, Dr. Nagy Tamás, Aczél Ákos – Alkalmazott mérnöki rugalmasságtan, Széchenyi István Egyetem, 2013
- [75] 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.
- [76] Memane, K., Mashalkar, A., & Kumar, P. (2023, February). A review thin-wall-tube energy-absorbing structure: crash-box. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2426, No. 1, p. 012060). IOP Publishing.
- [77] Segade, A., Bolaño, A., López-Campos, J. A., Casarejos, E., Fernández, J. R., & Vilán, J. A. (2018). Study of a crash box design optimised for a uniform load profile. In *Proceedings of the 6th International Conference on Integrity-Reliability-Failure*.

- [78] Pavlovic, A., & Fragassa, C. (2024). Investigating the crash-box structure's ability to absorb energy. *International Journal of Crashworthiness*, 1-15.
- [79] Li, Q. F., Liu, Y. J., Wang, H. D., & Yan, S. Y. (2009, April). Finite element analysis and shape optimization of automotive crash-box subjected to low-velocity impact. In *2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation* (Vol. 2, pp. 791-794). IEEE.
- [80] Redhe, M., Nilsson, L., Bergman, F., & Stander, N. (2005, May). Shape Optimisation of a Vehicle Crash-box using LS-OPT. In *Proceedings 5th European LS-DYNA users conference*, 5a-27.
- [81] Ingrassia, T., & Nigrelli, V. (2018). Shape optimisation of high-energy absorbers. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY*, 9(5), 867-875.
- [82] Zhou, C. H., Wang, B., Luo, H. Z., Chen, Y. W., Zeng, Q. H., & Zhu, S. Y. (2017). Quasi-static axial compression of origami crash boxes. *International Journal of Applied Mechanics*, 9(05), 1750066.
- [83] Wu, J., Zhang, Y., Li, K., & Su, L. (2022). Origami-inspired metamaterials hierarchical structure with tailorable crushing behaviour. *Construction and Building Materials*, 345, 128328.
- [84] Cui, Z., Qi, J., Tie, Y., Zou, T., & Duan, Y. (2023). Research on the energy absorption properties of origami-based honeycombs. *Thin-Walled Structures*, 184, 110520.
- [85] Dionisius, F., Rohmat, Y. N., Yusuf, M. M., Suliono, S., Haris, E., & Endramawan, T. (2020, May). An increase in crashworthiness capability using a pyramid arrangement of the crush initiator. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 850, No. 1, p. 012049). IOP Publishing.
- [86] Dionisius, F., Istiyanto, J., Sumarsono, D. A., Prayogo, G., Baskoro, A. S., & Malawat, M. (2022). Modelling of crashworthiness criteria based on the variation of the hole as a crush initiator in a thin-walled square. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 19(1), 9487-9497.
- [87] Köseadağ, E. (2024). Response of trigger type to circular CFRP crash box energy absorption performance. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 123-130.
- [88] 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.
- [89] Kumar, S. (2008). *A numerical study on the axial crush characteristics of thin-walled rectangular tubes subjected to dynamic impact* (No. 2008-01-0242). SAE Technical Paper.
- [90] Zhang, X., Cheng, G., You, Z., & Zhang, H. (2007). Energy absorption of axially compressed thin-walled square tubes with patterns. *Thin-Walled Structures*, 45(9), 737-746.
- [91] Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Spentzas, K. N., Ioannidis, M. B., Koutroubakis, S., & Kostazos, P. K. (2009). The effect of the implementation of circular holes as crush initiators on the crushing characteristics of mild steel square tubes: experimental and numerical simulation. *International Journal of Crashworthiness*, 14(5), 489-501.
- [92] Altin, M., Halis, S., & Yücesu, H. S. (2017). Investigation of the effect of corrugated structure on crashing performance in thin-walled circular tubes. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 1(2), 1-7.
- [93] Yuan, L., Shi, H., Ma, J., & You, Z. (2019). Quasi-static impact of origami crash boxes with various profiles. *Thin-Walled Structures*, 141, 435-446.

- [94] Djamaluddin, F. (2024). Optimisation of foam-filled crash-box under axial loading for a pure electric vehicle. *Results in Materials*, 21, 100505.
- [95] Wang, G., Zhang, Y., Zheng, Z., Chen, H., & Yu, J. (2022). Crashworthiness design and impact tests of aluminium foam-filled crash boxes. *Thin-Walled Structures*, 180, 109937.
- [96] Özen, İ., Gedikli, H., & Aslan, M. (2023). Experimental and numerical investigation on energy absorbing characteristics of empty and cellular-filled composite crash boxes. *Engineering Structures*, 289, 116315.
- [97] Magliaro, J., Altenhof, W., & Alpas, A. T. (2022). A review of advanced materials, structures and deformation modes for adaptive energy dissipation and structural crashworthiness. *Thin-Walled Structures*, 180, 109808.
- [98] Wan, X., Wang, W., Liu, J., & Tong, T. (2014). Estimating the sample mean and standard deviation from the sample size, median, range and/or interquartile range. *BMC Medical Research Methodology*, 14, 1-13.
- [99] Gupta, M. K., & Singhal, V. (2022). Review of materials for making lightweight vehicles. *Materials Today: Proceedings*, 56, 868-872.
- [100] Noorsumar, G., Robbersmyr, K., Rogovchenko, S., & Vysochinskiy, D. (2020). *Crash response of a repaired vehicle-influence of welding UHSS members* (No. 2020-01-0197). SAE Technical Paper.
- [101] Kennedy, A. (2012). Porous metals and metal foams made from powders. *Powder Metallurgy*, 2, 31-46.
- [102] Cs. Kádár, P. Kenesei, „Napjaink korszerű anyagai: a fémhabok,” *Fizikai Szemle*, p. 279., 7-8. 2008.
- [103] Rajak, D. K., Gupta, M., Rajak, D. K., & Gupta, M. (2020). Applications of metallic foams. *An insight into metal-based foams: processing, properties and applications*, 21-37.
- [104] Orbulov, I. N. (2017). *Alumínium és alumínium ötvözet mátrixú szintaktikus fémhabok gyártása és mechanikai tulajdonságai* (Doctoral dissertation, BME Gépészmérnöki Kar).
- [105] GÁBORA, A., BALOGH, G., THALMAIER, G., & MANKOVITS, T. (2023). Perlites alumínium habok gyártása, fizikai és mechanikai vizsgálata: Manufacturing, physical and mechanical testing of perlite reinforced. *Nemzetközi Gépészeti Konferencia–OGÉT*, 148-151.
- [106] Ramamurty, U., & Paul, A. (2004). Variability in the mechanical properties of a metal foam. *Acta materialia*, 52(4), 869-876.
- [107] Kohári Dóra – Fémhabok, Pórusos anyagok, BME, 2019
- [108] 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.
- [109] Hassanli, F., & Paydar, M. H. (2021). Improvement in energy absorption properties of aluminium foams by designing pore-density distribution. *Journal of materials research and technology*, 14, 609-619.
- [110] Behai Composite - <https://www.beihaicomposite.com/> (Letöltés: 2025.07.16.)
- [111] Wiener Csilla – Fémhabok szerkezeti és mechanikai vizsgálata, Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Anyagfizikai Tanszék Budapest, 2006
- [112] Anyagok világa – Fémhabok előállításának módszerei, http://anyagokvilaga.hu/tartalom/2001/apr/kenesei_kadar_rajkovits_lendvai.htm (Letöltve : 2024.07.26.)
- [113] Ramesh, R., Prasanth, A. S., Krishna, R., KoushikSundaram, K., Mozhi Selvan, R. A., & Roy, A. (2020, December). Experimental and numerical analysis of compression

- behaviour of 3D printed metal foams. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1706, No. 1, p. 012213). IOP Publishing.
- [114] Thiagarajan, R., Sakthivel, G., Jegadeeshwaran, R., Lakshmipathi, J., & Kumar, M. S. (2023, September). Compressive deformation behaviour of closed-cell aluminium syntactic foam. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2601, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.
- [115] Mysarh, A. M., & Abdelshafy, M. H. (2022, July). Quasi-static compressive behaviour of aluminium foam. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2299, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.
- [116] Fiedler, T., Movahedi, N., York, L., & Broxtermann, S. (2020). Functionally-graded metallic syntactic foams produced via particle pre-compaction. *Metals*, 10(3), 314.
- [117] International Standard – ISO 13314:2011 ISO-13314-2011.pdf (iteh.ai) (09.05.2024)

A jelölt értekezéssel kapcsolatos publikációi

- [KJ118] Kertész, J., & Kovacs, T. A. (2024). Friction Investigation of Closed-Cell Aluminium Foam during Radial-Constrained Test. *Materials*, 17(13), 3344.
- [KJ119] Kertész, J., & Kovács, T. A. (2022, September). Importance of Vehicle's Unloaded Weight Optimisation: The Personal Injury Severity Point of View. In *IFIP International Conference on Human Choice and Computers* (pp. 303-314). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [KJ120] Kertész, József ; Kovács, Tünde Anna Anyag- és gyártástechnológiai trendek a korszerű járművek tömegoptimalizációja érdekében, Mérnöki Szimpózium a Bánkin Előadásai : Proceedings of the Engineering Symposium at Bánki (ESB 2023) Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem (2024) 367 p. pp. 280-285., 6 p.
- [KJ121] Kertész, J., & Kovács, T. A. (2024). Finite element analysis regarding the folding behaviour of different crashbox versions. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 105375.
- [KJ122] Kertész, J., Menyhárt, J., & Kovács, T. A. (2024). Investigation of Heavy Vehicle Underrunning Guard Focusing on the Energy Absorbing Issue. *Advances in Science and Technology*, 153, 79-87.
- [KJ123] Kertész, J., File, M., Nyikes, Z., Kovács, T. A., & Tóth, L. (2023). Al-Foam Compression Tests in Parallel and Serial Concepts. *Applied Sciences*, 13(2), 883.
- [KJ124] József, Kertész ; Tünde, Kovács Elektromos járművek passzív ütközésbiztonsági rendszerei BIZTONSÁGTUDOMÁNYI SZEMLE 5 : 4 pp. 55-65. , 11 p. (2023)
- [KJ125] Kertész, J., & Kovács, T. A. (2022). Effect of the Radial Constraint for the Impact Energy-Absorbing Behaviour of the Closed-Cell Metal Foam. In *Vehicle and Automotive Engineering* (pp. 139-150). Cham: Springer International Publishing.
- [KJ126] Kertész, J., & Kovacs, T. A. (2022, August). Optimised metal foam-filled Crushbox structure to improve the impact energy absorption. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1246, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.
- [KJ127] Kertész, J. ; Kovács, T.A. Konstruktív megoldások az utoléréses balesetek következményeinek csökkentésére INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING AND MANAGEMENT SCIENCES / MŰSZAKI ÉS MENEDZSMENT TUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 7 : 1 pp. 70-83., 14 p. (2022)
- [KJ128] KERTÉSZ, József; KOVÁCS, Tünde A.; FILE, Máté; GÉRESI, Zoltán Effect of the Different Speed Compression on the Mechanical Behaviour of Aluminium Foam EUROPEAN JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 7: 3 pp. 183-194., 12 p. (2022)

- [KJ129] Kertész, József; Kovács, Tünde Anna Elektromos járművek többlettömegének hatása a közlekedésbiztonságra, Mérnöki Szimpózium a Bánkin előadásai, Proceedings of the Engineering Symposium at Bánki (ESB 2022) Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem (2022) 312 p. pp. 187-193.
- [KJ130] Kertész, József; Kovács, Tünde Anna Gépjárművek ütközésbiztonsági megbízhatóságának alakulása a járművek korának előrehaladtával HADITECHNIKA 56: 5 pp. 45-51., 7 p. (2022)
- [KJ131] Kertész, József; Kovács, Tünde Anna Impact Energy Absorbtion by Active Braking MŰSZAKI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK (EN) 16 pp. 36-42., 7 p. (2022)
- [KJ132] Kertész, József; Nyikes, Zoltán; Pinke, Péter; Kovács, Tünde Anna Investigation of the Energy Absorption of the Aluminium Foam JOURNAL OF PHYSICS-CONFERENCE SERIES 2315: 1 Paper: 012026, 6 p. (2022)
- [KJ133] József, Kertész; Tünde, Kovács Alacsony ütközési sebességre optimalizált többtagú crashbox szerkezet BIZTONSÁGTUDOMÁNYI SZEMLE 5: (2024)

A jelölt értekezéssel nem kapcsolatos publikációi

- [KJ134] Tiba, Zsolt; Kertész, József; Husi, Géza; Békési, Zsolt: Drivetrain modification of the IVECO150e Eurocargo Hard-press Garbage Truck In: Mankovits, Tamás (szerk.) Proceedings of the 1st international scientific conference on advances in mechanical engineering (ISCAME 2013): 10-11 October 2013, Debrecen, Hungary Debrecen, Magyarország: Debreceni Egyetem Műszaki Kar (2013) 229 p. pp. 194-200.
- [KJ135] Zsolt, Tiba; Jozsef, Kertes; Geza, Husi; Zsolt, Bekesi Replacing The Ice by Electric Motor of The Iveco 150E Eurocargo HARD-Press Garbage Truck In: Husi, Géza; Sahin, Yildirim; Radu, Cătălin Țarcă (szerk.) Transactions on Mechatronics 2013: Proceedings of VI. Electrical Engineering and Mechatronics International Conference, Electrical Engineering and Mechatronics session Debrecen, Magyarország: Debreceni Egyetem (2014) pp. 98-106.
- [KJ136] Tiba, Zsolt; Kertész, József. Design of the stator frame and air compressor drive for replacing the internal combustion engine of the IVECO 150E eurocargo hard-press garbage truck. In: Sándor, Bodzás; Tamás, Mankovits (szerk.) Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2014) Debrecen, Magyarország: University of Debrecen Faculty of Engineering (2014) pp. 167-172.
- [KJ137] Kertész, József CAN bus system developments of vehicles In: Sándor, Bodzás; Tamás, Mankovits (szerk.) Proceedings of the International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2014) Debrecen, Magyarország: University of Debrecen Faculty of Engineering (2014) pp. 49-54.
- [KJ138] Bodzas, Sandor; Bekesi, Zsolt; Kertes, Jozsef; Szorcsik, Tamas Tooth Contact Analysis of a Designed Planetary Gear Drive for the Vehicle Industry JOURNAL OF PRODUCTION ENGINEERING 24: 2 pp. 20-26, 7 p. (2021)
- [KJ139] Bodzás, Sándor; Békési, Zsolt; Kertész, József; Szorcsik, Tamás The CAD Modelling Possibilities of Gear Pairs by Two Ways in the Mechanical Engineering Practice INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING AND MANAGEMENT SCIENCES / MŰSZAKI ÉS MENEDZSMENT TUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 6: 2 pp. 205-219., 15 p. (2021)
- [KJ140] Bodzás, Sándor; Békési, Zsolt; Kertész, József; Szorcsik, Tamás The CAD Modelling Possibilities of Gear Pairs by Two Ways in the Mechanical Engineering Practice INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING AND MANAGEMENT

SCIENCES / MŰSZAKI ÉS MENEDZSMENT TUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 6:
2 pp. 205-219., 15 p. (2021)

- [KJ141] Menyhárt, J., Kertész, J., & Szemes, P. (2025). Analysis of the Feasibility of Integrating Electric Vehicles into Vehicle-to-Grid Systems in Hungary. *Advances in Science and Technology*, 165, 235-242.

Rövidítés jegyzék

ACEA- European Automobile Manufacturers' Association (Európai Gépjárműgyártók Szövetsége)
AIS-Abbreviated Injury Scale (Rövidített sérülési skála)
AW-Aluminium Wrought (Kovácsolt alumínium)
CFE-Crashing Force Efficiency (Gyűrődési erő hatékonysága)
CP-Plastic Energy Ratio (Plasztikus energia hányad)
db-darab
EA-Energy Absorbing (Energia abszorpció)
EN-European Norm. (Európai norma)
g-gramm
GPa-Gigapascal
HIC-Head Injury Criteria (Fej sérülési kritérium)
IIHS- Insurance Institute for Highway Safety (Közúti Biztonsági Biztosítási Intézet)
ISO-International Standard Organization (Nemzetközi Szabványügyi Szervezet)
J-Joule
J/g-Joule/gramm
kN-kilo newton
MAT-Material (anyag)
MCF-Mean Crashing Force (Gyűrődési erő középérték)
mm-milliméter
Mpa-Megapascal
ms-millisecond
NCAP-European New Car Assessment Programme (Európai Új Autó Értékelési Program)
NHTSA- National Highway Traffic Safety Administration (Nemzeti Közúti Közlekedésbiztonsági Igazgatóság)
OCN-Octagonal Conic Notched (Nyolcszögletű kúpos bordázat)
OC-Octagonal Conic (Nyolcszögletű kúpos)
O-Octagonal (Nyolcszögletű)
PCF-Peak Crashing Force (Gyűrődési csúcserő)
RCN-Rectangular Conic Notched (Téglalap kúpos bordázott)
RC-Rectangular Conic (Téglalap kúpos)
RN-Rectangular Notched (Téglalap bordázott)
R-rectangular (Téglalap)
RSD-Relative Standard Deviation (Relatív szórás)
SCN-Special Conic Notched (Speciális kúpos bordázott)
SC-Special Conic (Speciális kúpos)
SEA-Specific Energy Absorbing (Fajlagos energiaeinyelés)
SE-Stroke Efficiency (Lökethatékonyság)
SN-Special Notched (Speciális bordázott)
SP-Specimen (próbadarab)
S-Special (speciális)
STDEV-Standard Deviation (Standard eltérés)
ULC- Undulation of Load Carrying Capacity (Teherbírás ingadozás)
VEM-Végeselemes módszer

Táblázatjegyzék

1. táblázat Az AIS kódok az elhalálozási valószínűség függvényében (Saját szerkesztés [37] alapján).....	12
2. táblázat Az AIS és HIC kapcsolata (Saját szerkesztés [37] alapján).....	13
3. táblázat A próbadarabok geometriai adatai [KJ115]	37
4. táblázat A platószakaszra vonatkoztatott abszorpciós és hatékonysági értékek [KJ115].....	47
5. táblázat A 0,4 g/cm ³ típusú hab által elnyelt energia szabad és radiálisan gátolt zömítés alkalmával [KJ115]	48
6. táblázat A 0,7 g/cm ³ típusú hab által elnyelt energia szabad és radiálisan gátolt zömítés alkalmával [KJ115]	48
7. táblázat Súrlódási ellenállás értékei [KJ115]	52
8. táblázat Energia szükséglet a fémhab és a cső fala közötti súrlódás leküzdéséhez (0,4 g/cm ³ fémhab esetén) [KJ115].....	53
9. táblázat Energia szükséglet a fémhab és a cső fala közötti súrlódás leküzdéséhez (0,7 g/cm ³ fémhab esetén) [KJ115].....	54
10. táblázat A vizsgálatához használt fémhabok energia elnyelő képessége az alakváltozás függvényében [KJ120]	59
11. táblázat A párhuzamos elrendezésű konstrukció energia abszorpciója [KJ120]	61
12. táblázat A soros elrendezésű fémhab konstrukció energia abszorpciója [KJ120].....	63
13. táblázat Az összetett soros elrendezés energia abszorpciója	66
14. táblázat A VEM vizsgálatához használt konstrukciók és azok jelölése [KJ118]	69
15. táblázat AlMgMnSi1 alumínium jellemző mechanikai jellemzői [KJ118].....	70
16. táblázat Az egyes keresztmetszet típusokhoz tartozó gyűrődési jellemzők [KJ118]	75
17. táblázat A kúpszög iteráció eredményei	76
18. táblázat A bordázat hatása a gyűrődési jellemzőkre	80
19. táblázat Egységnyi térfogatra és tömegre vonatkoztatott energia abszorpció [KJ118].....	83
20. táblázat A vizsgálat eredményei	85
21. táblázat A kezdeti csúcserő követelményének megfelelő konstrukciók pontozása.....	85
22. táblázat A vizsgálatához használt próbadarabok jelölései és az egyes alkatrészek tömege. 98	
23. táblázat A konstrukciók abszorpciós értékei 40mm-es alakváltozásig.....	104
24. táblázat Az erő fluktuációra vonatkozó eredmények	108

Ábrajegyzék

1. ábra A redukált követési távolság értelmezése	2
2. ábra A Ráfutásos balesetek tendenciája Magyarországon (Saját szerkesztés [7] alapján).....	8
3. ábra A baleseteket kiváltó okok (Saját szerkesztés [7] alapján).....	9
4. ábra A ráfutásos balesetek jellemző személyi sérülései a mozgási energia függvényében [KJ124].....	10
5. ábra Példa a ráfutásos baleset gyorsulás függvényre [31].....	11
6. ábra A reakció idő szerepe a fékezési és az ütközési folyamatban (Saját szerkesztés [41] alapján).....	15
7. ábra Lökharító rendszer felépítése [KJ118]	17
8. ábra Felső és alsó folyáshatár értelmezése (Saját szerkesztés [49] alapján)	21
9. ábra Feszültséggyűjtő megoldások [88]	24
10. ábra Zhang által vizsgált feszültséggyűjtők (a. alap konstrukció; b. minden oldalról hornyolt; c. szemközti oldalak szimmetriája) [90]	25
11. ábra A gyűrődési képesség jellemzésére szolgáló paraméterek [96].....	27
12. ábra A fémhabokra jellemző gyűrődési karakterisztika főbb pontjai [KJ125][13-14].....	34
13. ábra Normálerő értelmezése radiálisan gátolt zömítés esetén [KJ115].....	36
14. ábra A súrlódási ellenállás meghatározásához használt próbadarabok [KJ115]	37
15. ábra A zömítési vizsgálatokhoz használt Instron 8801 fárasztógép [KJ115]	38
16. ábra A radiálisan gátolt zömítés koncepciója [KJ115]	39
17. ábra A cellaszerkezetek csuklós szerkezetként való ábrázolása (a. szabad zömítés; b. radiálisan gátolt zömítés) [KJ115]	40
18. ábra Az előzömítések során rögzített diagramok (a. $0,4 \text{ g/cm}^3$; b. $0,7 \text{ g/cm}^3$).....	40
19. ábra A súrlódásméréshez használt fémhabok előzömítése a csövön belül	41
20. ábra Statikus és kinematikus súrlódás kapcsolata [KJ115]	42
21. ábra A normál erők és a kontakt felületek alakulása, valamint a előzömített habok mozgatása utáni véghelyzet [KJ115].....	42
22. ábra Fémhab próbatetek felületvizsgálata mikroszkóppal [KJ115].....	43
23. ábra A zömítési vizsgálatok előtt készített mikroszkópos felvételek [KJ115]	43
24. ábra A jellemző cellaátmérők eloszlása [KJ115].....	44
25. ábra A fémhab és a cső belső palástja közötti kontakt felület pirossal jelölve [KJ115]	44
26. ábra A szabadzömítés erő-elmozdulás diagramja [KJ115].....	45
27. ábra A platószakasz alakulása a zömítés során [KJ115].....	45
28. ábra A $0,4 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű fémhab szabad és radiálisan gátolt zömítési karakterisztikája [KJ115].....	46
29. ábra A $0,7 \text{ g/cm}^3$ típusú fémhab szabad és radiálisan gátolt zömítési karakterisztikája [KJ115].....	46
30. ábra $0,4 \text{ g/cm}^3$ típusú hab abszorpciós karakterisztikája [KJ115].....	48
31. ábra $0,7 \text{ g/cm}^3$ típusú hab abszorpciós karakterisztikája [KJ115].....	48
32. ábra A súrlódási ellenállás mérés sorozat a különböző mértékben előzömített fémhab próbatetekkel [KJ115].....	51
33. ábra A $0,4 \text{ g/cm}^3$ típusú hab súrlódási ellenállása különböző mértékű előzömítések függvényében [KJ115]	51
34. ábra A $0,7 \text{ g/cm}^3$ típusú hab súrlódási ellenállása különböző mértékű előzömítések függvényében [KJ115]	51
35. ábra A súrlódási ellenállás mérés után készített metszet és a kezdeti vázlat [KJ115].....	52

36. ábra Sűrűlódási ellenállás a radiálisan gátolt zömítés során (0,4 g/cm ³ fémhab esetén) [KJ115].....	53
37. ábra Sűrűlódási ellenállás a radiálisan gátolt zömítés során (0,7 g/cm ³ fémhab esetén) [KJ115].....	53
38. ábra A radiálisan gátolt zömítéshez szükséges energia többlet és annak a sűrűlódási ellenállás okozta hányada (0,4 g/cm ³ fémhab esetén).....	54
39. ábra A radiálisan gátolt zömítéshez szükséges energia többlet és annak a sűrűlódási ellenállás okozta hányada (0,7 g/cm ³ fémhab esetén).....	55
40. ábra A soros és párhuzamos elrendezések értelmezése fémhabok zömítése esetén.....	58
41. ábra Fémhabok szabadzömítési karakterisztikája [KJ120]	60
42. ábra Párhuzamos elrendezés zömítésének folyamata [KJ120]	60
43. ábra Fémhabok zömítési karakterisztikája párhuzamos elrendezés esetén [KJ120].....	61
44. ábra A vizsgálathoz használt fémhab próbatestek a zömítés előtt [KJ120].....	62
45. ábra A soros elrendezés zömítési kondíciói [KJ119] [KJ120].....	62
46. ábra A soros elrendezés zömítési karakterisztikája [KJ120]	63
47. ábra A soros elrendezésre vonatkozó ellenőrző mérés eredménye [KJ120]	63
48. ábra A plasztikus deformáció abszorpciós kapacitása 80%-hoz viszonyítva.....	64
49. ábra A háromtagú soros elrendezés zömülése képekben.....	65
50. ábra A háromtagú soros elrendezés zömülési karakterisztikája	66
51. ábra A sűrűsödési alakváltozás alakulása a koncepciók függvényében	67
52. ábra A vizsgálathoz használt kényszerek [KJ118].....	70
53. ábra A választott anyagmodell és a paraméterezési folyamat validálása [KJ118]	71
54. ábra A validálás során kapott eredmények [KJ118]	72
55. ábra A konvergencia analízishez használt modell és a különböző hálósűrűségek [KJ118] 73	
56. ábra Az elem méret hatása az elem darabszámra [KJ118]	73
57. ábra A konvergencia analízis eredménye a kezdeti csúcserő tekintetében [KJ118].....	73
58. ábra A három alap szelvénytípus gyűrődési karakterisztikája [KJ118].....	74
59. ábra A kezdeti csúcserő alakulása a szelvény típusok függvényében [KJ118]	75
60. ábra Az F_{max} és EA értékek függése a próbatest kúpszögétől.....	76
61. ábra Az optimalizációhoz használt kúpszög értelmezése.....	76
62. ábra A kúpszög kezdeti csúcserőre való hatása [KJ118]	78
63. ábra Energia abszorpció az elmozdulás függvényében [KJ118].....	78
64. ábra A pozitív és negatív gyűrődést segítő bordázat értelmezése [KJ118]	79
65. ábra Gyűrődést segítő bordázatok hatása a kezdeti csúcserőre [KJ118].....	80
66. ábra Kúpossággal és gyűrődést segítő bordákkal optimalizált próbatestek [KJ118]	81
67. ábra A kúpszög és a gyűrődést segítő bordázat együttes hatása a kezdeti csúcserő értékére [KJ118].....	81
68. ábra A kúpszög és gyűrődést segítő bordázat együttes hatása a gyűrődési karakterisztikára [KJ118].....	82
69. ábra A konstrukciók CFE és SE értékei	83
70. ábra KR 100475898 B1 sz. szabadalom egyszerűsített ábrája (Forrás : KR 100475898 B1)	87
71. ábra KR 42789874 B1 sz. szabadalom egyszerűsített ábrája (Forrás : KR 42789874 B1) 88	
72. ábra Az energia elnyelő berendezés felépítése összeszerelt és robbantott ábrán	89
73. ábra A szerkezet sematikus ábrája a belső működési mechanizmus ismertetéséhez [KJ130]	89
74. ábra A véglemezen kialakított, az axiális megvezetést szolgáló kimunkálás.....	90

75. ábra Deformáció áttétel fogalmának értelmezése [KJ130]	91
76. ábra Az energia abszorpció folyamata [KJ130]	92
77. ábra A szerkezet egyszerűsített vázlata összeszerelt kezdeti és összetolt helyzete [KJ130]	93
78. ábra A találmány első aspektusa szerinti energiaelnyelő berendezés előnyös kiviteli alakjai [KJ130].....	95
79. ábra A találmány második aspektusának zömítési lépései eltérő abszorber töltet esetén [KJ130].....	96
80. ábra A találmány második aspektusának zömítési lépései azonos abszorber töltet esetén [KJ130].....	96
81. ábra A konstrukciók felhasználási lehetősége	97
82. ábra A méréshez használt próbadarabok összeszerelés előtt	97
83. ábra A próbadarabok a zömítő vizsgálatok előtt	98
84. ábra A SP1 jelölési próbadarab zömülésének főbb lépései	99
85. ábra A 1.sz. konstrukció zömülési karakterisztikája azonos fémhab töltet (SP1) esetén (a. szerkezet belsejében történő fémhab zömülés; b. a teljes szerkezet zömülési karakterisztikája) [KJ130].....	99
86. ábra A SP2 jelölési próbadarab zömülésének főbb lépései	100
87. ábra A 1.sz. konstrukció zömülési karakterisztikája eltérő fémhab töltet (SP2) esetén (a. szerkezet belsejében történő fémhab zömülés; b. a teljes szerkezet zömülési karakterisztikája)	100
88. ábra Az SP3 jelölésű próbadarab zömülési karakterisztikája	101
89. ábra Az SP1 és SP2 próbadarabok abszorpciós karakterisztikája	101
90. ábra SP4 típusú koncepció zömülési folyamata	102
91. ábra SP4 jelölésű próbadarab zömítési karakterisztikája	103
92. ábra Az 2.sz. konstrukció zömítése során jelentkező kihajlási probléma	103
93. ábra SP5 jelölési próbadarab zömülési folyamata.....	106
94. ábra A crashbox üres és fémhabbal töltött változata	107
95. ábra A fémhabbal töltött szelvény (SP6) zömülésének folyamata	107
96. ábra Fémhab töltet hatása az alakváltozási stabilitásra	108
97. ábra Az SP1 konstrukció zömülésének plató szakasza.....	108

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Prof. Dr. Kovács Tündének, hogy végig kísérte a munkámat, és amiért mindig segítségemre volt szakmai és ügyviteli kérdésekben is. Köszönöm neki az emberséges, biztató támogatást és a mindig valódi bátorítást, amit kaptam Tőle a doktori tanulmányom során.

Köszönöm File Máténak, Balogh Gábornak és Géresi Zoltánnak, hogy segítségüket adták a laboratóriumi vizsgálatokhoz, és hogy a mérésekkel kapcsolatos tapasztalataikat megosztották velem.

Köszönöm feleségemnek, Kertész Lorettának és kislányomnak, Kertész Annának, hogy türelmet, biztatást és lelki támogatást adtak ahhoz, hogy ez a dolgozat létrejöhessen.