

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem



**Közlekedésmérnöki Kar
Gépjárművek Tanszék**

**Autóbuszok ütközésállósági vizsgálatai és vizsgálati módszerei,
különös tekintettel a borulásbiztonságra, a vázszerkezetek
képlékeny csuklóira és zónáira**

Ph.D értekezés tézisei

Készítette:

Vincze-Pap Sándor
okleveles gépészmérnök

Témavezető:

Dr. Melegh Gábor
egyetemi docens

Budapest
2008

1. A kutatások előzménye

A fémek alakíthatósági tulajdonságát már évszázadok óta használjuk a hagyományos meleg és hideg fémalakítási technológiáknál, pl. a kovácsolásnál, hengerlésnél vagy sajtolásnál. Képlékenységen (vagy más szóval alakíthatóságon) az anyagok azon tulajdonságát értjük, hogy különböző mechanikai igénybevételek hatására törés és repedés nélkül (kristályszerkezeti repedések nélkül, az atomok kötéseinek megszakadása nélkül), az anyaguk folytonosságának megtartásával képesek az alakjukat változtatni.

A képlékenység nem abszolút tulajdonsága az anyagnak, hanem az állapot tényezőknek is függvénye. Ilyen állapot tényezők: a feszültségi állapot; a hőmérséklet; az alakváltozási sebesség.

Az egyes fémek szakítódiaagramját és alakíthatóságát összevetve megállapítható, hogy az a fém alakítható jobban, amelynek nagy a nyúlása és a kontrakciója. Az alakítás erőszükséglete szempontjából pedig az a fém kedvezőbb, amelyiknek a folyási görbéje laposabb.

Az érvényes elméletek szerint a képlékeny alakváltozás az atomsíkok elcsúszásával valósul meg. Az elcsúszás azokon a síkokon megy végbe, ahol a legtöbb atom található. Az atomsíkok elcsúszása azonban nagy csúszatófeszültséget igényel, a csúszás megindításához és fenntartásához elméletileg mintegy ezerszer akkora feszültségre lenne szükség, mint amit kísérletekkel mértek. Ezt az ellentmondást a *Vito Volterra* által 1905-ben kifejlesztett diszlokáció elmélet oldotta fel, amelyet – egy időben, de végső soron egymástól függetlenül – *Orován Egon (1902-1989)*, *Polányi Mihály (1891-1976)* és *G. I. Taylor* terjesztett ki a fémek képlékeny alakváltozására még az 1930-as években. [1] Eszerint a kristálysíkok elcsúszása nem az atomsíkok merev testhez hasonlítható elcsúszásával megy végbe, hanem kristályhibák közvetítésével, az egyik atomsor a diszlokációk segítségével mintegy „végiggörög, végigfut” a másik atomsoron.

A járműveket, különösen a nagy teherbírású haszonjárműveket, és ezek közül is elsősorban az autóbuszokat, jelentős mértékben vékonyfalú zártszelvényekből építik fel.

Egy jármű fémszerkezetében (nyomó, hajlító vagy csavaró) terhelés hatására az anyag a folyáshatárt meghaladó feszültség esetén megfolyik, megváltozik az alakja, szemmel is látható módon geometriája jelentősen módosul, az anyag „gyűrődik”, ún. *képlékeny csukló* alakul ki.

A képlékeny csuklóknak nincs nemzetközileg elfogadott definíciója, a legrészletesebb leírását *Matolcsy* [43] adja. Az ott található meghatározásokat alapul véve, részben kissé átfogalmazva, a dolgozatban a következő értelmezéseket használom:

a. *Elemi képlékeny csukló* rúdszerű alkatrészekben alakul ki (ahol a hosszirányú méret nagyságrenddel nagyobb, mint a másik kettőirányú méret) egyszerű igénybevétel hatására és a stabilitásvesztéshez tartozó igénybevétel egy relatíve kis területen okoz képlékeny alakváltozást; az eredeti keresztmetszet lényegesen torzul; az alakváltozással torzult képlékeny csukló mérete hosszabb, mint a rúdszerű alkatrész keresztmetszete. Az elemi képlékeny csuklókat feloszthatjuk az alakváltozás irányától függően is, és beszélhetünk lineáris, elforduló (rotációs) vagy kombinációs elemi csuklókról is.

b. *Egyedi képlékeny csukló* olyan nem rúdszerű elemeken alakul ki, amelyeknek nincs egyetlen kitérített (hosszirányú) kiterjedése (például lemezek behorpadásakor, vagy zártszelvények oldalerő hatására történő összerogyásakor), legtöbbször többfajta (összetett) egyidejű igénybevétel lép fel esetükben, és amelyeknél szintén a képlékeny alakváltozással bekövetkező összegyűrődés okozza a stabilitásvesztést, de kiterjedése nem olyan szabályos alakú, mint az elemi képlékeny csuklóé.

c. *Összetett képlékeny csukló* vagy más elnevezéssel *képlékeny zóna* nem rúdszerű alkatrészekben, hanem összetett lemez, nyitott- vagy zártszelvények és azok kombinációjából felépített szerkezeti csomópontok, környezetek esetén értelmezhető, amikor a stabilitásvesztés több, nem csupán egyetlen elemi vagy egyedi képlékeny csukló kialakulásához köthető. A terhelés

hatására kialakuló elemi és egyedi képlékeny csuklók sorozata vezet a szerkezeti környezet tönkremeneteléhez. A képlékeny zóna magában foglalja az elemi és egyedi képlékeny csuklókat; összetett képlékeny csukló esetén nincs értelme annak hosszáról beszélni, a képlékeny zónának csak kiterjedése van.

2. A téma ismertetése

Járművek frontális ütközésekor, borulásakor a járműszerkezeteket felépítő fémlemezek, nyitott és zártszelvények deformálódnak, maradók, képlékeny alakváltozást szenvednek, a járműszerkezetekben a fentebb tárgyalt képlékeny csuklók alakulnak ki.

Jelen dolgozatban mechanikai kísérleti módszerekkel azt tanulmányozom, és azt elemzem, hogyan lehet az autóbuszok frontális ütközésekor és borulásakor kialakuló képlékeny csuklók energiaelnyelési tulajdonságait, kísérleti karakterisztikáit különböző jellegű és irányú terhelésekre feltérképezve és megmérve a jármű egyes vázrészeit energiaelnyelés és alakváltozás szempontjából egymáshoz jobban illeszteni. Azt kutatom, hogyan lehet az autóbuszok borulásakor a vázszerkezet energiaelnyelését konzervatív módon számszerűsíteni egyszerűbb statikus módszerrel, ill. hogyan lehet az autóbuszt felépítő zártszelvények energiaelnyelési képességét növelni, az autóbuszok ütközésbiztonságát javítani.

A vázolt feladatkör egyszerűsített meghatározással és szűkített értelemben a vékonyfalú zártszelvényű négyszög és kvázi négyszög keresztmetszetű szelvényekből felépített autóbusz vázrészek képlékeny csuklóinak vizsgálatát jelenti, ez a disszertáció témája.

3. Irodalmi áttekintés, kutatóhelyi előzmények

A világméretű járműbiztonsági kutatások (aktív + passzív biztonság) csak az 1960-as évek második felében kezdődtek. Ezek elsősorban a személyautók biztonságának növelését tűzték ki célul, és biztonságos járművek kifejlesztésével az egyre növekvő országúti balesetek csökkentése volt a cél. Az USA-ban az NHTSA (Nemzeti Autópálya Biztonsági Hivatal) 1966-os megalakulása után megkezdődött a *Szövetségi Motoros Járműszabványok* (FMVSS) megalkotása. 1969-ben meghirdették a világméretű ESV (Experimental Safety Vehicle) programot. 1971-ben volt az első ESV konferencia, amely járműbiztonsági (aktív-, passzív- és utasbiztonság) témakörben a legnagyobb, kettőévente megrendezett nemzetközi kutatói fórum.

Magyarország bár nem vett közvetlenül részt a nemzetközi ESV személyautó fejlesztési összefogásban, viszont a 60-as évek második felében az Ikarus 200-as család fejlesztési igényei és az 1971-ben megindult magyar autóbusz-fejlesztési programunk révén a buszok gyártástechnológiájának és passzív biztonsági kutatásaival (borulás, üléslekötés szilárdság, frontális ütközésállóság) csatlakoztunk Európa élenjáró országaihoz és „autóbusz-szakértő” országává váltunk az elmúlt 40 évben. Ugyancsak 1971-ben kezdődött a háromévente nemzetközi szinten megrendezett magyar Autóbusz Szakértői Tanácskozás sikertörténete is, mint Európa e tárgykörben tartott első átfogó konferenciája. Számos autóbuszra vonatkozó európai biztonsági előírás kezdeményezése és érdemi munkája hazai szakértők tevékenységéhez kötődik és ezen belül is az Ikarus fejlesztéseivel kapcsolódva az AUTÓKUT és annak Autóbusz Főosztálya volt a központ. Ide kötődik az én szakmai működésem is.

Az ekkor elindult hazai passzív biztonsági kutatásoknak hála, magyar kutatók is már a kezdetektől foglalkoztak az ütközésbiztonság követelményeivel kifejezetten autóbusz vázszerkezetekre vonatkozóan.

A képlékeny csuklók vázszerkezeti kialakulásával, matematikai, héjelméleti modellezésével foglalkozók közül *Davis, Chang, Wierzbicki, Mahmood, Paluszny* nevét kell először megemlíteni, a képlékeny csuklók kialakulásakor fellépő erő, nyomaték és energiaelnyelés kérdéseivel rajtuk kívül *Abramovicz, Pifko, Vignjevic* munkáiban találkozhatunk. [4-15]

A nemzetközi kutatásokkal egyidőben Magyarországon is előtérbe került az autóbuszok vázszerkezeteiben kialakuló *képlékeny csuklók* kutatása és nemzetközi szinten is jelentős eredmények, dolgozatok születtek. Sőt, némi büszkeséggel azt is mondhatjuk, hogy a buszok passzív biztonságának kutatásai hazánkból indulva váltak nemzetközivé. Ebben a témakörben, a képlékeny csuklók működési mechanizmusának matematikai leírásával, karakterisztikájának matematikai közelítésével, modellezésével, ill. a vékonyfalú zártszelvényekben kialakuló *képlékeny csuklóknak* az autóbuszok vázszilárdságra gyakorolt hatásával frontális ütközés és borulásos baleset esetén, magyar kutatókat is ki kell emelnünk, elsősorban *Molnár, Matolcsy, Voith* munkáira hivatkozva. [32-38]

A képlékeny csuklók statikus és dinamikus erőhatásra történő energiaelnyelése fontos megválaszolandó gyakorlati feladat (amelyet a korszerű, járműütközésekre is kifejlesztett végeeselemes technikák –LS Dyna, Pam Crash- is használnak), de szakirodalmi háttere meglehetősen hiányos. A kísérleti háttér sem alkalmas az ilyen jellegű dinamikus energiaelnyelés vizsgálatra, mert a méréseket vagy függőleges ejtő vizsgálatokkal, vagy egy ettől némileg korszerűbb, vízszintes irányban repülő tömeggel végzik, ám mindkét rendszernél az ellensúly alá van támasztva és a kényszereken keresztül távozó energia mérésére nincsen eszköz. A vízszintes repülő súlyos vizsgálatoknál kapott eredmények szerint –ld. *Kim és tsai* [25] dolgozata-, négyzet keresztmetszetű lágyacél csövek axiális terhelésekor egyező képlékeny alakváltozás eléréséhez dinamikus vizsgálat (6-10 m/s ütközési sebesség) esetén 10-30%-kal nagyobb energiát kell közölni, mint statikus vizsgálat esetén.

A buszok frontális ütközése és a borulásbiztonsága mindig kiemelkedő témakör volt az Autóbusz Szakértői Tanácskozásokon és ezeken a legnevesebb külföldi kutatók (*Kecman, Wierzbicki, Tidbury, Aparació, Sadeghi*) szintén megjelentek dolgozataikkal. [16-20]

A képlékeny csuklók összetett, vázszerkezetekben történő viselkedésével, egymásra hatásával személyautók vonatkozásában, *Hollowell, Prasad, Zeidler* munkái adnak kiváló tájékozódást. [21-24]

Az autóbuszok ütközésbiztonságának (lökhárítók energiaelnyelése, utasülések lekötése, szilárdsága, a vázszerkezetek borulásbiztonsága) kérdéseivel Magyarország az elsők között kezdett foglalkozni és nagyszámú kísérletet végeztünk ebben a témakörben. (A lökhárító és borulásbiztonsági vizsgálatok kifejezetten a képlékeny csuklók tulajdonságainak alaposabb megismerését jelentették.) A buszok passzív biztonságának témáinak kiemelkedő hazai képviselői *Matolcsy, Molnár Cs., Voith, Pintér, Batiz, Véssey*, akik nagyon sokszor a külföldi kutatásokat megelőzően számos új elgondolással és eredménnyel bővítették és segítették a buszok ütközésbiztonságának fejlődését, új buszos előírások létrejöttét. [28-31] [38-50]

A dolgozat témájához tartozó buszok borulásbiztonságának vizsgálati követelményére, vizsgálati módszerére számos elgondolás született, az egyszerűsített, elméleti háttérű vizsgálati módszerek alapvetése a képlékeny csuklók sorozatos kialakulására vezette vissza az ellenőrzést. Közös jellemzőjük a képlékeny csuklók karakterisztikáinak matematikai formában megjelenítése, azok beépítése az elméleti számítógépes modellbe. [13] [19] [42]

Ezeknek a szimulációknak a validálása természetesen csak megfelelő számú és előre meghatározott kialakítású képlékeny csukló kísérleti mérésével történhet.

A képlékeny csuklók energiaelnyelésének növelésére kézenfekvő megoldás, ha az adott külső méretű szelvény vastagságát növeljük, ami megtörténik a váztervezési folyamatban, vagy ha

rögzített szelvényméret (befoglaló méret, vastagság) mellett a belsejét valamilyen nehezen összenyomható anyaggal feltöltjük. A nemzetközi szakirodalomban elsősorban *Santosa* [26-27] munkáival találkozhatunk, aki alumínium habbal töltött zártszelvények energiaelnyelését vizsgálta, és a 0,55 kg/dm³ sűrűségű habanyag mintegy kétszeresére növelte a hajlításkor elnyelt energiát.

4. Célkitűzések, vizsgálati módszerek

4.1 A megoldandó feladat ismertetése, jelentősége, aktualitása

A dolgozatban bemutatott kutatásaim alapvetően azt célozzák, hogyan lehet az autóbusz elemeinek, váztagyoségeinek erő- és energia szempontú illesztését javítani, energiaelnyelését növelni, a képlékeny alakváltozással járó energiaelnyelést pontosan ellenőrizni

— az ütközéskor fellépő axiális erőterhelés esetén, illetve

— boruláskor a döntően hajlításra történő igénybevételnél

kialakuló képlékeny csuklók karakterisztikáinak ismeretében, azok módosításával, a képlékeny csuklók energiaelnyelési képességének növelésével.

A kutatások része volt

— a vázszerkezeti nyomó- és hajlító terhelés hatására kialakuló képlékeny csuklók energiaelnyelő képességének növelésére különböző eljárások kidolgozása,

— az előírt és alkalmazott autóbusz borulásbiztonsági, vizsgálati eljárások ellenőrzése, összehasonlíthatóságuk kritikai elemzése, pontosságuk számszerűsítése, ill.

— új autóbusz tetőszilárdság ellenőrző eljárás, új vizsgálati módszer kifejlesztése.

A kitűzött feladatokat, a képlékeny csuklók működésének vizsgálatait, részben egyszerű elemeken, részben összetettebb karosszéria szegmenseken, részben komplett autóbusz vázszerkezeteken végeztem. Nagy, terebélyes szerkezetekre vonatkozóan a mérési pontosságot mindenképpen növelhetjük, ha egyszerre több képlékeny csuklót mérünk, sőt a legpontosabb, ha az együtt dolgozó képlékeny csuklók egymásra gyakorolt hatását is egyidejűleg, eredő hatásként mérjük, pl. egy adott keresztseggemnek hajlító vizsgálatával.

A dolgozatban található kísérleteimet, vizsgálataimat –a képlékeny csuklók számát tekintve-, gyakorlatilag három bonyolultsági szinten végeztem:

— egyszerű vékonyfalú acél zártszelvények egyesével, különállóan mért elemi képlékeny csuklóinak,

— autóbusz váz keresztseggemnek több (jellemzően 8-32 db) egyszeres és többszörös képlékeny csuklóinak és zónáinak, ill.

— komplett autóbusz vázszerkezetek (jellemzően 24-100 db) képlékeny csuklóinak és zónáinak ellenőrző kísérleti méréseivel.

Az alapcélkitűzés a képlékeny csuklók működésének, módosíthatóságának feltérképezése - jelentőségét legkézzelfoghatóbban az autóbuszok ütközésbiztonságának növelése adja. A gazdaságos javítást lehetővé tevő jobban illeszthető lökhárító elemek létrehozásában, a borulásbiztonság vizsgálati módszerének fejlesztésében és a baleseti sérülések súlyosságát csökkentő, a borulásbiztonságot növelő szerkezeti módosításokban jeleníthetők meg az aktuális lehetőségek.

4.2 Vizsgálati módszerek, alkalmazott eljárások

A vizsgálati módszerek a kísérleti mechanika laboratóriumi alpmódszerei voltak: statikus nyomó- és hajlító vizsgálatok, ingás ütközővizsgálatok, frontális ütköző vizsgálatok és különböző típusú (statikus, dinamikus) borítóvizsgálatok komplett autóbuszokkal illetve autóbusz részegységekkel. A labormérések analóg jeladókkal (gyorsulás-, erő-, és elmozdulás-mérőkkel, nyúlásmérő bélyegekkel), analóg- és digitális erősítővel, az adatrögzítések pedig analóg mérőmagnetofonokkal és digitális számítógépekkel történtek.

5. Új tudományos eredmények

5.1

Ütközési és nyomó vizsgálatokkal igazoltam, hogy előrenyomott, vékonyfalú, zártszelvényű profilokból, ütközési energia és erőirányok szempontjából pontosabban illeszthető és lényegesen nagyobb energiaelnyelésre képes lökhárító (energiaelnyelő) szerkezetek építhetők különböző berendezésekhez (kiemelten az autóbuszokhoz) mint normál, nem előrenyomott szelvényekből és ezek készítésére eljárást dolgoztam ki. [S1-S7]

Vékonyfalú zártszelvényű négyszög, ill. kvázi négyszög keresztmetszetű acél szelvények (oldalak aránya: $a/b \leq 2$, falvastagság: $t \leq 2$ mm) statikus axiális nyomóterhelések hatására történő, nagy alakváltozással járó képlékeny csukló kialakulásait vizsgáltam. Megállapítottam, hogy az első képlékeny csuklóhoz tartozó maximális nyomóerő csúcs értéke több mint 50%-kal nagyobb, mint a többi (második, harmadik, negyedik, stb...) képlékeny csuklóhoz tartozó maximális nyomóerő értéke. Ezt a karakterisztika tulajdonságot felhasználva igazoltam, hogy az első képlékeny csuklóhoz tartozó erőcsúcson túl a második képlékeny csuklóhoz tartozó erőcsúcs szintjéig előrenyomott acél zártszelvények több mint 30%-kal nagyobb energiaelnyelésre képesek, adott maximális stabilitásvesztési erő feltételt előírva, mint a normál szelvények. Ezek alapján kidolgoztam egy eljárást az ütközési energiaelnyelő elem előállítására, azzal jellemezve, hogy zártszelvényű, a kihajlási határnál kisebb hosszúságú csövet/ üreges szelvényt axiális irányú nyomó hidegalakításnak vetünk alá egyetlen körbefutó gyűrődés létesítéséhez mindaddig, amíg a terhelő erő az első körbefutó gyűrődést létrehozó erőcsúcserővet követően lecsökken a második körbefutó gyűrődést létrehozó – célszerűen kísérletileg megállapított – erőcsúcserővetig. Axiális nyomóterhelésű vizsgálataimból az is kiderült, hogy már kisebb méretbeli hibák (220 mm hosszú szelvények végeinek 3-5°-os párhuzamostól eltérése) is befolyásolják a képlékeny csukló kialakulási folyamatot. Ha az első képlékeny csukló szabályosan kezd kialakulni, akkor ezután a második és a további képlékeny csuklók is szabályosan alakulnak ki, míg ha a képlékeny csukló kialakulás csupán egyoldali gyűrődéssel indul, akkor a többszörös képlékeny csukló kialakulás elmarad, kihajlással végződik a képlékeny tönkremenetel. Megállapítottam, hogy az első képlékeny csuklóval már rendelkező, előrenyomott zártszelvényeknek nem csak energiaelnyelési szempont szerinti illeszthetősége, de további alakváltozási, képlékeny csukló(k) kialakulási folyamatának kezelhetősége is jobb, az erőterhelési irány kisebb módosulását is jobban elviselik, mint a normál, nem előrenyomott szelvényeké.

5.2

Kísérletekkel bizonyítottam, hogy térbeli, egyedi megtámasztást igénylő fémszerkezetek energiaelnyelési képességét nem lehet ingás ütésvizsgálattal pontosan megállapítani. [S8-S11]

Acél anyagú, vékonyfalú zártszelvényekből (oldalak aránya: $a/b \leq 2$, falvastagság: $t \leq 3$ mm) és (1-5 mm vastagságú) lemezekből felépített terebélyes (2,5 m széles, 2-3 m magas, 1-1,5 m

hosszúságú) és elvileg mereven alátámasztott és lefogott zártszelvény-cső-lemez vázszerkezetek energiaelnyelési, képlékeny alakváltozási folyamatait vizsgáltam ingás ütőművel (3500 kg tömeggel, 3,5 m ingahosszal) és statikus hajlító vizsgálatokkal. Ezekben a szerkezetekben jellemzően 8-32 db képlékeny csukló ill. képlékeny zóna alakul ki az igénybevétel folyamán. Az adott felépítésű szerkezetek ingás ütővizsgálati és statikus hajlító vizsgálati folyamatainak és eredményeinek összevetésével megállapítottam, hogy

- a. a képlékeny csuklók kialakulásának helye, jellege és folyamata megegyezik a kétfajta vizsgálatnál;
- b. a vizsgálati szerkezet rugalmas és képlékeny csukló kialakulásokkal járó alakváltozásaira az inga kiindulási (helyzeti) energiájának nem pontosan meghatározható hányada fordítódik összevetve a statikus vizsgálat eredményeivel; megmértem, hogy az inga nem nyel el értékelhető mennyiségű energiát az ütéskor, tehát az inga által közölt energia jelentős része, az egyedi megtámasztáson keresztül, a rendszer definiálatlan nyitottsága miatt kikerül a rendszerből.

Az eredményekből az következik, hogy egyedi (különböző terebélyes szerkezetek részben eltérő megtámasztású) eseteiben az ingás ütővizsgálat csak összehasonlító vizsgálatokra használható, acél zártszelvényekből és lemezekből felépített terebélyes szerkezetek pontos energiaelnyelési képességének meghatározására az ingás vizsgálat nem alkalmas.

5.3

Összehasonlító vizsgálatok alapján kimutattam, hogy térbeli jármű karosszéria szegmensek statikus hajlító vizsgálatával konzervatív becslést lehet adni a teljes jármű valós borítóvizsgálati eredményére. [S12-S14]

A képlékeny csuklók kialakulási folyamatát és energiaelnyelő képességét nagy kiterjedésű összetett vázszerkezetek (8-12 m hosszú, 2-2,5 m széles, 2-3 m magas szerkezetek, jellemzően autóbuszok) borítóvizsgálatával vizsgáltam, ahol a kialakuló képlékeny csuklók és zónák száma nagy, jellemzően 24-100 között mozog. Az ilyen összetett vázszerkezetet (1-2,5 m hosszúságú autóbusz keresztseggemensekre) karosszériaszakaszokra bontva, azokat ingás és laboratóriumi hajlító kísérletekkel szintén vizsgáltam. A háromfajta eredményt összevetve, megállapítottam, hogy a valós vázegységek, keresztseggemensek laboratóriumi hajlító vizsgálati nem csak a hibás eredményre vezető ingás ütővizsgálatok kiváltására alkalmasak, hanem a dinamikus borító vizsgálatoknak is megfelelő helyettesítő, konzervatív módszere. A statikus hajlító laborvizsgálatnál a képlékeny csuklók kialakulásának folyamata egyező a dinamikus borítóvizsgálat folyamatában észlelhető képlékeny alakváltozási sorrenddel és folyamattal. Az összehasonlító vizsgálatok alapján kimutattam, hogy statikus vizsgálatnál, az összetett vázszerkezet (autóbusz) tömegéből, súlyponti helyzetéből számított energiaelnyelést biztosítva, a deformáció mértéke, a képlékeny csuklók alakváltozása nagyobb, mint dinamikus borítóvizsgálatnál. Tehát ha egy szerkezet deformációja statikus laboratóriumi vizsgálat alapján a megengedett határon belül marad, akkor - ugyanakkora energiaközlés esetén-, dinamikus vizsgálat során a szerkezet deformációja ettől kisebb mértékű lesz. A kísérletekből az is igazolható volt, hogy a gyártástechnológiának lényeges befolyása van a vázszegek vizsgálati eredményeire.

5.4

Az autóbuszok tetőszilárdságának ellenőrzésére új, a vázszegek laboratóriumi hajlító vizsgálatain alapuló, számítógépes iterációs eljárást dolgoztam ki. [S15-S20]

Nagy kiterjedésű összetett szerkezetek (pl. autóbuszok) borulásakor számos egyszerű rotációs és összetett képlékeny csukló alakul ki a vázszerkezetekben. Kimutattam, hogy az összetett

(autóbusz) vázszerkezetet több (jellemzően 4-8 darab) 1-2,5 m hosszúságú, a teljes keresztmetszetet magában foglaló keresztmetszemenekre bontva (esetleg a szegmenseket duplázva a terhelés könnyebb kézben tarthatóságáért) laboratóriumi statikus vizsgálatokkal konzervatív becslést lehet adni az összetett szerkezetre jellemző borulásszilárdság mértékére. A terhelést a valós borító vizsgálatkor bekövetkező felütközési szögben, merev lappal (az autóbusztól vett kifejezéssel) a tetőélen támadva fejtjük ki, és jól nyomon követhetően, ellenőrizhetően, reprodukálhatóan lehet a nagy alakváltozással járó deformációs folyamatot kézben tartani, az adott keresztmetszemen képlékeny csuklóinak energiaelnyelési karakterisztikáját megmérni.

Ahhoz, hogy az egyes részegységek alakváltozási eredményeiből azután az összetett vázszerkezet képlékeny csuklóinak deformációs, alakváltozási folyamatát is nyomon követhessük, számítási eljárást dolgoztam ki. A laborvizsgálattal kapott nemlineáris erő-deformáció karakterisztikákat egy számítógépes iterációs eljárásba építettem, amely biztosítja a valós borításnál alapfeltételnek tekintett energiaelnyelési, tetőél elmozdulási feltételeket. Az iterációs számítás biztosítja a tetőél pontok egy egyenesen maradását, amely a valós borító vizsgálat alaptulajdonsága, bemenő paraméterként magában foglalja az oldaloszlopok képlékeny csuklóinak helyzetét, a deformáció-energiaelnyelés összefüggés folyamatos kontrolját. Az összetett szerkezetre így kapott eredmény konzervatív módon alulról közelíti a megkövetelt borulásszilárdság mértékét, a dinamikus boruláskor fellépő valós deformációktól nagyobb oldaloszlop deformációkat ad eredményül.

5.5

Laboratóriumi hajlító vizsgálatokkal bizonyítottam, hogy acél zártszelvények energiaelnyelési képessége utólag, fémszerkezeti átalakítás nélkül, speciális műgyanta feltöltéssel növelhető. [S21-S24]

Négyzög keresztmetszetű vékonyfalú acél anyagú zártszelvények (oldalak aránya: $a/b \leq 2$, falvastagság: $t \leq 2$ mm) hajlításra történő képlékeny alakváltozásait, rotációs képlékeny csuklóit vizsgáltam. Megállapítottam, hogy a képlékeny csuklók hajlító igénybevételi energiaelnyelő képessége jelentősen, több mint 30%-kal, hajlító erő maximumuk mintegy 20%-kal növelhető, amennyiben korrózióálló, nem zsugorodó, $0,8 \text{ kg/dm}^3$ sűrűségű, kétkomponensű műgyantával töltjük fel a belső üregüket. Gyakorlati példákkal igazoltam, hogy kész járművön, utólag is elvégezhető az autóbuszok tetőszilárdságának, borulásbiztonságának növelése műgyanta feltöltéssel.

6. Az eredmények gyakorlati hasznosítása

- laboratóriumi kísérlettel igazoltam, hogy a jelenleg alkalmazottaknál több mint 30%-kal nagyobb energiaelnyelésre képes lökhárítót készíthetünk egy normál autóbuszhoz, ugyanazt a rendelkezésre álló térrészt és tömeghányadot használva. Az általam javasolt (cserélhető, előrenyomott acélprofilokból) autóbusz lökhárító kísérleti változata elkészült, de gyári alkalmazásra nem került;
- a kifogásolt ingás vizsgálati módszert törölték a módosított EGB 66.01 számú autóbusz tetőszilárdság előírás vizsgálati módszerei közül;
- a szegmensek laboratóriumi statikus hajlító vizsgálatán és iterációs számítógépes eljárás alapján alapuló AUTÓKUT-módszer az autóbuszok tetőszilárdságának ellenőrzésére –alapelveit tekintve– ma már elterjedten, széles körben használatos;

- a műgyanta feltöltéses eljárás gyakorlati felhasználása a Csepel Lyra és az E98 típusú autóbuszoknál megtörtént, azok mellső ajtóoszlopainak merevítésére használtuk sikeresen, összesen több mint 40 db gyártott autóbuszra vonatkozóan;
- a zártszelvények nyomó- és hajlító vizsgálatainak eredményei jól használhatók autóbusz karosszéria elemek számítógépes modelljeinek előzetes igénybevételi számításához, ill. ilyen jellegű vége-selemes számítási eljárások validálásához.

A tézispontokhoz kapcsolódó saját tudományos közlemények

- [S1] Vincze-Pap S.: Emberi türésértékek, biomechanika, Jár-művek, 2001/10-11-12. szám, Budapest, 275-277 (10. sz.) old., 302-308 (11-12. SZ.) old.
- [S2] Dr. Molnár Csaba, Vincze-Pap Sándor: Ütközési energiaelnyelő elem főleg járművekhez és eljárás az elem előállítására (Szolgálati találmány, 1982. December, szabadalmi szám: B60 R/19/00)
- [S3] Vincze-Pap S.: Autóbuszok méretezése frontális ütközésre, Anyagvizsgálók Lapja, 2003/4 szám 129-133. oldal
- [S4] Vincze-Pap S: Solutions and problems to be solved in bus/coach passive safety, 10th EAEC European Automotive Congress, ISBN 86-80941-30-1, Beograd, 30 May – 1 June 2005
- [S5] Vincze-Pap S: Személyautók passzív biztonsága (Gyűródéssel a biztonságért, 1.rész) - Természet Világa - 2003 januári szám
<http://www.chemonet.hu/TermVil/archiv/tv2003/tv0302/vincze.html>
- [S6] Vincze-Pap S: Személyautók passzív biztonsága (Ütközésállóságra tervezés, virtuális tesztek, 2.rész) - Természet Világa - 2004 januári szám
<http://www.termeszetvilaga.hu/szamok/tv2004/tv0401/passziv.html>
- [S7] Csiszár A, Vincze-Pap S: Real and simulated crashworthiness tests on buses, 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Paper No.: 05-0233, DOT HS 809 825, Washington, D.C. June 6-9, 2005
- [S8] Vincze-Pap S.: Realized Superstructure-Strength Methods on Buses, Criticism of ECE 66 Regulation, The Third International Conference on Safety and the Environment in the 21st Century Nov. 1994, Tel-Aviv
- [S9] Vincze-Pap S: Autóbusz vázelemeken végzett ingás ütővizsgálatok tapasztalatai (Buszszakértői Tanácskozás 1997 Szept., Budakalász, Jár-művek 1997 okt.)
- [S10] Vincze-Pap S.: Észrevételek az Autóbuszok tetőszilárdságának vizsgálati módszereihez. A Magyarországon használt kombinált számítós eljárás, XXXIII. Nemzetközi Autóbusz Szakértői Tanácskozás, ISBN 963 9058 17 3, Keszthely, 2002.
- [S11] Vincze-Pap S.: Jár-művek passzív biztonsági vizsgálatai az AUTÓKUT-ban, Jár-művek és Mezőgazdasági gépek, 1995. szeptember, Budapest, pp. 321-325
- [S12] Vincze-Pap S: Autóbuszok passzív biztonsági követelményei és vizsgálati módszerei, I. Gépjármű Konferencia, 2000. Szept. 4-5, Tata & Jár-művek 2000/11. szám
- [S13] Vincze-Pap S.: Ütközésbiztonság- „túlélési tér”, Jár-művek, 2001/8-9. szám, 212-219. old.
- [S14] Vincze-Pap S: Autóbuszok passzív biztonsága -Természet Világa - 2006 februári szám
<http://www.termeszetvilaga.hu/szamok/tv2006/tv0602/passz.html>
- [S15] S. Vincze-Pap: European Test Methods for Superstructures of Buses and Coaches Related to ECE R66 (THE APPLIED HUNGARIAN CALCULATION METHOD) (16th International Conference on the Enhanced Safety Vehicles Conference, June 4-8 1998, Windsor, Canada), DOT HS 808 759, No. 98-S4-P-19, pp. 927-931. <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/nrd-01/esv/esv16/98s4p18.pdf>
- [S16] Vincze-Pap S.: A korszerű autóbuszok passzív biztonsága, XVIII. Nemzetközi Haszonjármű Biztonsági Kongresszus Tata, 2001.09.20-21.

- [S17] *S. Vincze-Pap, Z. Tatai*: Simulations of Bus-Seat impact Tests According to the ECE Regulations (16th International Conference on the Enhanced Safety Vehicles Conference, June 4-8 1998, Windsor, Canada), DOT HS 808 759, No. 98-S4-P-18, pp. 920-926.
<http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/nrd-01/esv/esv16/98s4p19.pdf>
- [S18] *S. Vincze-Pap*: Passive Safety Requirements and Testing Methods of Buses And Coaches According to the European and US Regulations, 60th ICB Seminar Warsaw, 18-20 April, 2001
- [S19] *S. Vincze-Pap*: Passive Safety Tests on Buses at AUTÓKUT, Innovative Automobile Technology - IAT '05, ISBN: 961-6238-95-7, pp. 787-795, Bled, Slovenia, 21st-22nd April 2005.
- [S20] *S. Vincze-Pap*: Survey of passive safety questions for buses & coaches, APSN Bus & Truck Passive Safety Workshop, Prague, 24. March 2005
- [S21] *S. Vincze-Pap, A. Csiszár*: Rollover Safety Increase and Adequacy for Buses due to the Laboratory Tests and Simulations (11th European Automotive Congress, 30 May-1 June 2007, Budapest)
- [S22] *Vincze-Pap S., Horváth N., Csiszár A., Szász A.*: Passzív biztonsági analízisek számítógéppel, XXXIII. Nemzetközi Autóbusz Szakértői Tanácskozás, ISBN 963 9058 17 3, Keszthely, 2002. szeptember 02-04.
- [S23] *Vincze-Pap S*: Homologation and Type Approvals of Vehicles and Vehicle Parts in Hungary, Homologation von Straßenfahrzeugen in Mittel- und Osteuropa, Leipzig, 10. April 2003, Dekra Symposium
- [S24] *S. Vincze-Pap*: Laboratory Tests on Bus Passive Safety, APSN Bus Passive Safety Workshop, Budapest, 22-23 September, 2004

Irodalmi hivatkozások listája

- [1] *Ali S. Argon, E. Orowan*: Physics of strength and plasticity, Cambridge, M.I.T. 1969
- [2] *Kalishky S.*: Képlékenységtan. Elmélet és mérnöki alkalmazások, Budapest: Akadémiai Kiadó, 1975. 504 p.
- [3] *Kalishky S.*: Elastoplastic analysis with limited plastic deformations and displacements, *Journal of Mechanics of Structures and Machines*, Vol.24. No.1. 39-50, 1996.8.
- [4] *Davis, R. G., and Magee, C. L.*: The Effect of Strain Rate Upon the Tensile Deformation of Materials, *Journal of Engineering Materials and Technology*, April 1975, pp.151-155.
- [5] *Wierzbicki, T., and Abramowicz, W.*: A Kinematic Approach to Crushing of Shell Structures, *Proceedings of the 3rd International Conference on Vehicle Structural Mechanics*, Troy, Michigan, Oct. 10-12, 1979.
- [6] *Chang, D. C.*: Effects of Flexible Connections on Body Structural Response, SAE Paper No. 740041, 1974.
- [7] *Kecman D.*: Bending collapse of rectangular Section Tubes in the Relation to the Bus Roll Over Problem, PhD Thesis, Cranfield Institute, 1978
- [8] *Mahmood H. F., and Paluszny, A.*: Design of Thin Wall Columns for Crash Energy Management - Their Strength and Mode of Collapse, SAE Fourth International Conference on Vehicle Structural Mechanics, Nov. 1981, Paper No.811302.
- [9] *Mahmood, H. F., and Paluszny, A.*: Axial Collapse of Thin Wall Cylindrical Column, Fifth International Conference on Vehicular Structural Mechanics, Detroit, 1984, SAE Paper No. 840727.
- [10] *Wierzbicki, T., and Abramowicz, W.*: On The Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 50, pp. 727-734, Dec. 1983.
- [11] *Hanefi E.H., Wierzbicki T.*: Axial Resistance and Energy Absorption of Externally Reinforced Metal Tubes, *Composites Part-B*, Vol. 270, p. 387-394, 1996

- [12] Pifko, A.B. and Winter, R. (1981) Theory and Applications of Finite Element Analysis to Structural Crash, in *Structural and Nonlinear Solid Mechanics*, A.K. Noor and H.G. McComb (eds.), Pergamon Press, Oxford.
- [13] Vignjevic, Kecman, D., and Sadeghi, M.: The Improved Compound Beam Element with Nonlinear Moment-Rotation Curves for the Car Side Impact and Roof Crush Analysis Using DYNA3D Program, ASME Proceedings on Crashworthiness and Occupant Protection in Transportation Systems, AMD-Vol. 169, BED-Vol. 25, 1993
- [14] Abramowicz, W.: Compatibility of Energy Absorbing Structures, IJCRASH'98, Conference Proceedings, Dearborn, Michigan, September 9-11, 1998.
- [15] Ng, P., and Tidbury, G.H.: The Development of a Vehicle Angled Side Collision Computer Simulation Program, SAE Proceedings of the 6th International Conference on Vehicle Structural Mechanics, April 1986, Paper No. 860822.
- [16] Aparacio I., Fransisco G.G.: Bus accidents, Spanish survey for 1984-1988, XXI. Meeting of Bus and Coach Experts, Budapest, 1990
- [17] Tidbury G.: The Strength of the superstructure of buses. Proc. of 6th Meeting of Bus and Coach Experts, Budapest, 1975
- [18] Kecman D., Peric D., Sajic I.: Software for prediction of plastic behaviour and collapse of columns and joints in frameworks, XXI. Meeting of Bus and Coach Experts, Budapest, 1990
- [19] Djokic M., Kecman D.: Modelling of nonlinear rigid joints for assuming the bus structure, XXI. Meeting of Bus and Coach Experts, Budapest, 1990
- [20] Wierzbicki T., Matolcsy M., Molnár Cs.: Experimental-Theoretical Correlation of dynamically Crushed Components of Bus Frame Structure, XVII FISITA Congress, Budapest, June 4-10, 1978
- [21] Thornton, P. H.: Static and Dynamic Collapse Characteristics of Scale Model Corrugated Tubular Sections, ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Paper No. 75-Mat-G, 1975.
- [22] Prasad, P., and Padgaonkar, A. J.: Static to Dynamic Amplification Factors for Use in Lumped Mass Vehicle Crash Models, SAE Paper No. 810475, Feb. 1981.
- [23] Summers, S., Prasad, A., and Hollowell T. W.: NHTSA's Vehicle Compatibility Research Program, SAE Technical Paper Number 1999-01-0071 (SP-1442).
- [24] Zeidler, F., Knochelmann, F., and Scheunert, D.: Possibilities and Limits in the Design of Compatible Cars for Real World Accidents, SAE Paper 1999-01-0068, 1999.
- [25] Kim S., Im K., Hwang C., Yang I.: A study on Experimental Characteristics of energy Absorption Control in Thin-walled Tubes for the Use of Vehicular-Structure members, International Journal of Automotive Technology, Vol. 3, No 4, 2002
- [26] Santosa, Banhart, Wierzbicki: Bending Crush Resistance of Partially foam filled Sections, Advanced Engineering Materials 2, No 4, 2000
- [27] Santosa, S. and Wierzbicki, T.: Crash Behavior of Box Columns Filled with Aluminum Honeycomb Foam, Computers & Structures, pp. 333-367, 1998.
- [28] Voith A., Weszely I.: Autóbusz borulási folyamatának számítógépes szimulációja, Autóbusz Szakértői Tanácskozás, Budapest, 1975
- [29] Voith, A.: Utasbiztonság vizsgálata autóbusz felborulásos baleseteknél, Doktori értekezés, BME, 1976.
- [30] Voith A.: Die Prüfung des Kastengerippes mit Rücksicht auf den Überschlagunfall des Omnibusses, XV^e Congress de la FISITA, Párizs, 1974. A-2-11. p. 132-137.
- [31] Voith, A.: Kleinmodell-Prüfmethode zum Vergleich der Unfallsituationen im Bezug der Überschlagunfälle von Bussen, Nauka I Motorna Vozila 1979, Bled, 1979.

- [32] *Molnár Cs.*: Axiálisan nyomott vékonyfalú négyszög keresztmetszetű csövek stabilitásvesztése és energiaelnyelő képessége, Doktori értekezés, Nehézipari Műszaki Egyetem, Miskolc, 1977
- [33] *Matolcsy, M.*: Plastic hinge theory to analyse the structural strength and energy absorption of bus frames, Proc. Of Int Conference on science and Vehicle, Belgrade, 1987
- [34] *Voith, A.*: Karambol vizsgálati módszerek autóbuszok tetőszilárdságának ellenőrzésére, XII. Autóbusz Szakértői Tanácskozás, Budapest, 1981. 1. kötet, p. 283-292.
- [35] *Voith A. , Fehérvári Gy.*: Az autóbuszok tetőszilárdsága; vizsgálati módszerek és fejlesztési tapasztalatok, FISITA Congress, Melbourne, 1982.
- [36] *Molnár Cs., Matolcsy M.*: Behavior of Plastic Hinges Formed on Thin-Walled Tubes at Various Load Conditions, Structural Crashworthiness, Liverpool, 1983.09.14-16.
- [37] *Molnár Cs., Matolcsy. M.*: Description of Plastic Hinge Behavior in Bus Frameworks, Euromech 217., Pilisszentkereszt, 1986. 10.13-16.
- [38] *Batiz Z.*: Autóbusz balesetekből leszűrhető konstrukciós tapasztalatok, VI. Autóbusz Szakértői Tanácskozás, Budapest, 1975
- [39] *Molnár Cs.*: Plastic Deformations and Energy Consumption at Dynamic Impact Loads. Conference on "Design, Construction and Operation of Public Service Vehicles" Cranfield, Bedford (UK), 1977. July 11-13.
- [40] *Matolcsy M., Molnár Cs.*: Energy Absorption and Strength Problems of Bus Driver Compartment, "Science and Motor Vehicles '79", Bled, Yugoslavia, 1979. June 4-7.
- [41] *Molnár Cs., Matolcsy. M.*: Képlékeny csuklók működése autóbusz vázokban karambolok esetén, XVIII. Autóbusz Szakértői Tanácskozás, Budapest, 1987. 09.1-4.
- [42] *Molnár Cs., Pintér K.*: Autóbusz tetőszilárdság számítógépes szimulációja, XXI. Autóbusz Szakértői Tanácskozás, Budapest, 1990
- [43] *Matolcsy, M.*: Crashworthiness of bus structures and rollover protection. Crashworthiness of Transportation Systems: Structural Impact and Occupant Protection. Kulwer Academic Press. (ed. J.A. Ambrosio) 1997. p.321-360
- [44] *Matolcsy, M.*: Rollover safety for all bus categories. 36th Meeting of Bus and Coach Experts (2005 August), Budapest, GTE
- [45] *Matolcsy M., Batiz Z.*: Constructional analysis of accidents and accident statistics. Proc. of XVIII. Meeting of Bus and Coach Experts Budapest, GTE (1987) Vol. I.p. 251-258
- [46] *Matolcsy, M.*: Theoretical remarks of the rollover safety of buses. Proc. of 17 ESV Conference (2001) Amsterdam, Paper No 107 p.7.
- [47] *Matolcsy M.*: Modellezés problémái autóbuszok tetőszilárdságának számításakor (EGB 66-os előírás) XXVIII. Autóbusz Szakértői Tanácskozás előadása, Budakalász, GTE (1997) Megjelent: Járművek 44. évf. 8-9. szám p. 329-338.
- [48] *Matolcsy M.*: Lessons learned from the frontal collision tests of buses, FISITA Congress, Barcelona, 2004, May, Paper No. 2004 V286 p.14.
- [49] *Matolcsy M.*: General survey of bus frontal collisions: is regulation needed? Proc. Inst. Mech. Eng. Vol. 218 Part D: J. Automobile Engineering, D04003 IMechE (2204) p. 10
- [50] *Matolcsy M.*: Safety bumper on buses? Possible goals, requirements and consequences, 4th DEKRA-VDI Symposium: Safety of commercial Vehicles, Neumünster, Germany 2004 Oct. 20-21 p.10.
- [51] *Mares G., Matolcsy M.*: Autóbuszok passzív biztonsági fejlesztései Magyarországon az ENSZ-EGB-GRSA tevékenységeinek tükrében, Járművek, mezőgazdasági gépek 4-5. sz., Budapest, 1986