



21-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos
TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,
vykusios 2018 m. gegužės 4-5 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 21th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'
TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 4-5 May 2018, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 21-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»
ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 4-5 мая 2018 г., Вильнюс, Литва

AUTOBUSO HIBRIDINIO KARKASO STIPRUMO ĮVERTINIMAS APSIVERTIMO ATVEJU

Tautvydas Pravilonis, Edgar Sokolovskij

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Transporto inžinerijos fakultetas
El. paštas: tautvydas.pravilonis@vgtu.lt; edgar.sokolovskij@vgtu.lt*

Santrauka. Straipsnyje, pagal Jungtinių tautų Europos ekonomikos komisijos (JT/EEK) taisyklę Nr.66 atliekamas autobuso karkaso įvertinimas naudojantis kompiuterine modeliavimo programa. Siekiant sumažinti nuosavą transporto priemonės masę, konstrukcijoje naudojamos kompozitinės medžiagos. Užtikrinant, kad konstrukcija, sudaryta iš skirtingų medžiagų, būtų pakankamo stiprumo, atliekami apsisvertimo bandymo modeliavimai. Naudojantis baigtinių elementų metodų Ansys programoje sudaromas autobuso plieninio ir hibridinio karkaso modeliai ir atliekami deformacijų įvertinimai. Pagal gautus rezultatus atliekami palyginimai ir pateikiamos išvados.

Reikšminiai žodžiai: autobusas, karkasas, JT/EKK Nr. 66, saugumas, apsisvertimo bandymas, BEM.

Įvadas

Dauguma gamintojų, kurie gamina vidutinio dydžio autobusus, savo produkcijai deklaruoja mažesnę nuosavą masę. Gamintojų deklaruojama ir reali masė skiriasi. Todėl siekiant pervežti didesnę keleivių skaičių viena transporto priemone, gamintojai ne mažina keleivių skaičiaus, o tiesiog perkrauna transporto priemones. Taip į eksploataciją patenka perkrautos ir nesaugios transporto priemonės.

Siekiant, kad viešajame eisme dalyvaujantys autobusai būtų kuo mažiau perkrauti, kaip alternatyva, „klasikiniam“ autobuso karkasui, kuris gaminamas tik iš plieno, siūlomas karkasas, kuris būtų sudarytas iš bendrą autobuso masę lengvinančių medžiagų, t.y. iš kompozitinių medžiagų. Kompozitinės medžiagos vis dažniau naudojamos įvairių transporto priemonių gamybai (Jeon *et al.* 2013).

Vidutinio dydžio keleiviniai autobusai, skirtingai nei didieji keleiviniai autobusai, yra gaminami dviem etapais. Vidutinio dydžio autobusas susideda iš dviejų pagrindinių elementų: a) važiuoklės; b) keleivių skyriaus. Dažnu atveju keleivių skyrių projektuoja ir jį ant važiuoklės įrengia antrojo etapo gamintojai.

Siekiant, kad pagaminta transporto priemonė būtų saugi, kad būtų užtikrintas eismo dalyvių, keleivių ir kitų asmenų saugumas, ji turi atitikti keliamus saugumo reikalavimus. Vienas iš pagrindinių vidutinio dydžio autobuso saugumo reikalavimų yra aprašytas JT/EKK Taisyklėje Nr. 66. Šioje taisyklėje yra nustatyta, kad transporto priemonės konstrukcija turi būti tokia, kad atliekant apsisvertimo bandymą, bandymo metu ir po jo nebūtų pažeista

transporto priemonės saugos erdvė (*Jungtinių Tautų Europos ekonomikos komisijos... 2010*).

Kaip teigia Chirwa *et al.* (2015) autobuso apsisvertimas yra pavojingiausias tada, kuomet jis ant kieto paviršiaus nukrenta iš tam tikro aukščio. Toks apsisvertimas dažniausiai įvyksta autobusui judant kreive, kuomet jį veikia išcentrinis pagreitis (Karlinski *et al.* 2014).

Autobuso apsisvertimas yra labai pavojingas, nes jis sukelia didelę stogo ir šoninių sienų deformaciją. Esant didelei stogo ir šoninių sienų deformacijai, ženkliai sumažėja saugi erdvė. Sumažėjusi saugi erdvė gali sužeisti ar net mirtinai sužaloti keleivius. Todėl galima dar karta pabrėžti, kad autobuso karkaso konstrukcija turi tiesioginės įtakos keleivių saugumui ir gyvybei.

Hibridinis karkasas

Hibridinis karkasas, tai karkasas sudarytas iš skirtingų medžiagų, pvz. metalo ir kompozito.

Kompozitinė medžiaga, tai vienalytė medžiaga, sudaryta iš mažiausiai dviejų visiškai skirtingų medžiagų, kurios įgauna tokias savybes ir gali atlikti tokias funkcijas, kurių negalėtų atlikti būdamos atskirai. Taip pat kompozitinės medžiagos pasižymi tokiais privalumais: mažas svoris, didesnis standumas, didesnis atsparumas korozijai, didesnis atsparumas dilimui ir kt. (Li *et al.* 2017). Jos plačiai naudojamos įvairiuose gamybos sektoriuose: laivuose, orlaiviuose, pastatuose, tiltuose, automobiliuose ir kitose transporto priemonėse (Caccese *et al.* 2006). Transporto priemonėse kompozitinės medžiagos naudojamos siekiant sumažinti transporto priemonių konstrukci-

jos svorį. Kaip teigia Liu *et al.* (2013) „Comobus“ buvo sukurtas naudojant stiklo pluošto kompozito ir polipropileno komponentus; TILLOTSON Pearson Inc., kuris 30% sumažino nuosavą masę palyginti su tradiciniu metaliniu autobusu. Stiklo pluošto audinys buvo naudojamas stogo durų, grindų, rėmo ir sėdynių elementuose, kurių masė buvo sumažinta nuo 40% iki 60%. Siekiant autobuso konstrukcijoje panaudoti kompozitines medžiagas, būtų galima naudoti pultruzijos būdu pagamintus stiklo audinio kompozito uždaro skerspjuvio elementus. Pultruzijos būdu pagaminti gaminiai pasižymi geromis charakteristikomis, tokiomis kaip didelis stiprumas, mažas svoris ir atsparumas korozijai (Yang *et al.* 2015). Taikant hibridinio karkaso konstrukciją, tam tikri metaliniai konstrukcijos elementai būtų pakeisti į pultruzijos (pultruzija, tai toks gamybos būdas, kuomet stiklo pluoštas impregnuojamas tam tikroje dervoje ir veikiant išorinės traukos jėgos juda per atitinkamos formos štampą, kuris suformuoja reikiamos formos stiklo pluošto profiliuoti (Li *et al.* 2017)) būdu pagamintus stiklo/anglies pluošto kompozito profilius. Remiantis tokia informacija iš mokslinių straipsnių daroma prielaida, kad taikant tokią technologiją, autobuso nuosava masė sumažėtų apie 20 % ir taip ženkliai prisidėtų prie ekologinių ir ekonominių rodiklių gerinimo.

Apsivertimo bandymas

Bandymo stendas yra sudarytas iš apverčiamos platformos ir duobės kietu pagrindu (arba apverčiamos platformos, kuri yra įrengta 800 mm aukštyje nuo kieto pagrindo paviršiaus). Ant atverčiamos platformos yra pastatoma transporto priemonė.

Bandoma transporto priemonė turi būti tinkamai paruošta. Ji neprivalo būti pilnai įrengta ir parengta eksploatacijai. Galima bet kokia galutinio įrengimo modifikacija, jeigu tai neturi įtakos apkrovą laikiančios karkaso konstrukcijos pagrindinėms savybėms ir veikimui.

Pagrindinis reikalavimas, kurį turi atitikti bandoma transporto priemonė, yra sunkio jėgos centro vieta – ji turi būti tokia pati kaip ir pilnai įrengtos transporto priemonės. Taip pat bendroji transporto priemonės masė ir masių pasiskirstymas bandomojoje transporto priemonėje turėtų atitikti pilnai įrengtos transporto priemonės masę ir masių pasiskirstymą. Visi tie elementai, kurie, gamintojo teigimu, didina apkrovą laikiančios karkaso konstrukcijos stiprumą, montuojamos pagal projektą numatytoje vietoje. Visi kiti elementai, kurie neturi įtakos karkaso konstrukcijos stiprumui ir bandymo metu gali būti nepataisomai sugadinti, gali būti pakeičiami atitinkamos masės ir dydžio elementais. Taip pat ir kitus elementus, kurie bandymo metu gali sukelti pavojų (kaip pvz. degalai, akumuliatorių bateriją, kitos degios ar sprogios medžiagos) galima pakeisti atitinkamos masės elementais.

Jeigu transporto priemonės kaip viena iš sudedamųjų dalių yra keleivių saugos įranga, masė turi būti tvirtinama prie kiekvienos sėdynės, kurioje įmontuota saugos įranga. Galimi du papildomos masės tvirtinimo būdai: a) tvirtinama masė turi sudaryti 50 % individualios, 68 kg sveriančio, keleivio masės, sunkio jėgos centras turi būti 100 mm virš ir 100 mm į priekį nuo sėdynės taško R, masė turi būti saugiai ir tvirtai pritvirtinta; b) naudojamas antropo-

morfinis 68 kg sveriantis manekenas, kuris įtvirtinamas dvitaškiu saugos diržu.

Atliekant apsvertimo bandymą, platforma, ant kurios stovi transporto priemonė, turi būti tolygiai keliama, tol kol transporto priemonė pasiekia nestabilią padėtį ir pradeda virsti. Apverčiamos platformos kampinis greitis turi būti ne didesnis kaip 0,087 rad/s. Paviršius, ant kurio nuvirsta transporto priemonė turi būti sausas ir tolygus (*Jungtinių Tautų Europos ekonomikos komisijos... 2010*).

Savaime suprantama, kad pilnai įrengtos transporto priemonės apsvertimo bandymas yra patikimiausias ir gauti rezultatai yra tiksliausi, tačiau tokie bandymai yra labai brangūs. Todėl atsižvelgiant į tai, taikomi kiti lygiaverčiai apsvertimo bandymo metodai. Vienas iš tokių metodų – apsvertimo metodas naudojant karkaso sekcijas. Tačiau atliekant bandymą pagal tokį metodą, gauti rezultatai nėra tikslūs, nes jie apibūdina tik pasirinktos sekcijos (karkaso dalies) stiprumą. Įprastai skirtingos autobuso sekcijos turi skirtingus standumus. Taip pat, kai atskiros sekcijos yra sujungtos tarpusavyje, bendras konstrukcijos standumas yra žymiai didesnis, nei atskiros sekcijos (*Jungtinių Tautų Europos ekonomikos komisijos... 2010*).

Siekiant gauti geriausią rezultatą, apsvertimo bandymą reikėtų atlikti su pilnai įrengta transporto priemone. Kad pilnai įrengtos transporto priemonės bandymo atlikimo sąnaudos būtų sumažintos, gali būti taikomas kitas lygiavertis apsvertimo bandymo metodas – kompiuterinis apsvertimo modeliavimo metodas (*Jungtinių Tautų Europos ekonomikos komisijos... 2010*).

Kompiuterinis modeliavimas

Kaip nurodoma Jungtinių tautų taisyklės Nr. 66 devintame priede, konstrukcijos stiprumo įvertinimui galima taikyti kompiuterinį modeliavimo metodą. Kompiuterinis modeliavimo metodas dažnai taikomas įvairiose srityse, kur natūrinis bandymo atlikimas yra labai brangus ir ilgai trunkantis laiko atžvilgiu.

Taikant šį lygiavertį metodą, turi būti užtikrinta, kad bus įvykdyti esminiai 5 priede nustatyti apkrovą laikiančios karkaso konstrukcijos apsvertimo bandymo reikalavimai.

Atliekant apsvertimo bandymą transporto priemonė apverčiama į tą jos pusę, kuri atsižvelgiant į saugos erdvę yra pavojingesnė. Transporto priemonės apvertimo kryptis pasirenkama atsižvelgiant į šiuos aspektus: a) šoninį sunkio jėgos centro ekscentriškumą ir jo poveikį etaloniniam energijos kiekiui; b) saugos erdvės asimetriją; c) nevienodas, asimetrines abiejų transporto priemonės pusių konstrukcijos ypatybes. Atliekant apsvertimo bandymą transporto priemonė apverčiama į tą pusę, kurioje užtikrinamas mažesnis atsparumas apkrovai (*Jungtinių Tautų Europos ekonomikos komisijos... 2010*).

Labai svarbu nustatyti kuri transporto priemonės pusė yra silpnesnė. Tai nustatyti yra pakankamai sudėtinga. Dažniausiai autobusai vienoje pusėje turi įlipimo duris, kurios gali susilpninti tos pusės konstrukciją, bet iš kitos pusės, papildomi sustiprinimai, kurie naudojami įtvirtinti durims, gali netgi sustiprinti šios pusės konstrukciją. Taip

pat ir šoninės bagažinės, jei jos montuojamos tik vienoje pusėje, turi įtakos konstrukcijos stiprumui.

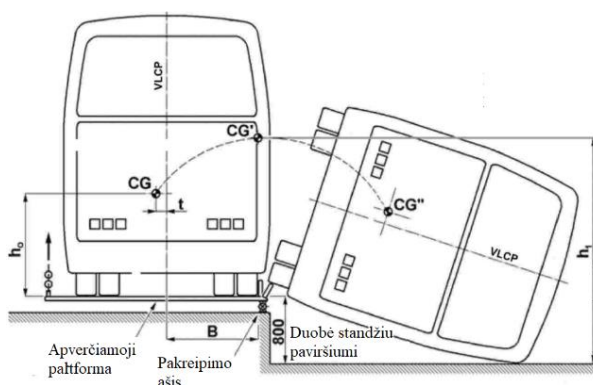
Atliekant kompiuterinį apsvertimo bandymo modeliavimą turi būti laikomasi tam tikrų sąlygų:

- modeliavimas gali prasidėti nestabilioje pusiausvyros pozicijoje, tačiau jis turėtų prasidėti ne vėliau kaip pirmojo kontakto su pagrindu momentu;
- pradinės sąlygos, pirmojo kontakto su pagrindu momentu, turėtų būti apibrėžtos naudojant energijos taupymo reikalavimą;
- modeliavimas turėtų būti atliekamas bent tol, kol bus pasiekta maksimali deformacija;
- modeliavimo programa turi pateikti stabilų sprendimą, kurio rezultatas nepriklauso nuo modeliavimo etapų kiekio;
- visos energijos sudedamosios dalys turėtų būti įvertinamos kiekviename žingsnyje;
- nefizinės energijos komponentai, atsirandantys dėl pvz. naudojamų stačiakampio formos elementų, skaitmeniniame modelyje neturėtų viršyti 5 procentų visos energijos, bet kuriame laiko momente;
- trinties koeficientas, naudojamas kontakto su pagrindu metu, turėtų būti patvirtintas fiziniams bandymų rezultatais arba skaičiavimais turėtų būti įrodyta, kad pasirinktas trinties koeficientas duoda konservatyvius rezultatus;
- visi galimi fiziniai kontaktai, kurie yra tarp atskirų transporto priemonės dalių, turėtų būti įvertinti sudarant autobuso skaitmeninį modelį (Karlinski *et al.* 2014).

Metalinio karkaso kompiuterinis modeliavimas

Autobuso karkaso apsvertimo modeliavimas atliekamas siekiant įvertinti konstrukcijos deformaciją (karkaso viršutinio kampo greitį ir pagreitį) jam atsitrenkus į betoninį pagrindą.

Karkaso apsvertimo skaičiuojamasis modelis parodytas 1 pav.



1 pav. Autobuso apsvertimo skaičiuojamasis modelis

Metaliniame karkase naudojamas plienas S235, kurio mechaninės savybės yra tokios:

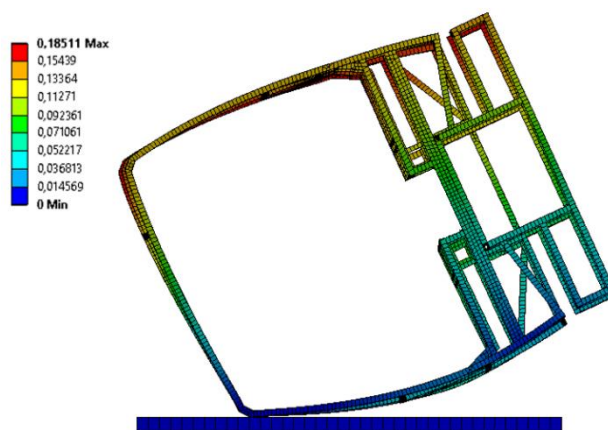
- tamprumo modulis – 2,1 1011 Pa;
- takumo riba – 235 MPa;
- tempimo riba – 360 MPa;
- svoris (40x40x3, 1 metro ilgio) – 3,59 kg.

Konstrukcijos masė 560 kg.

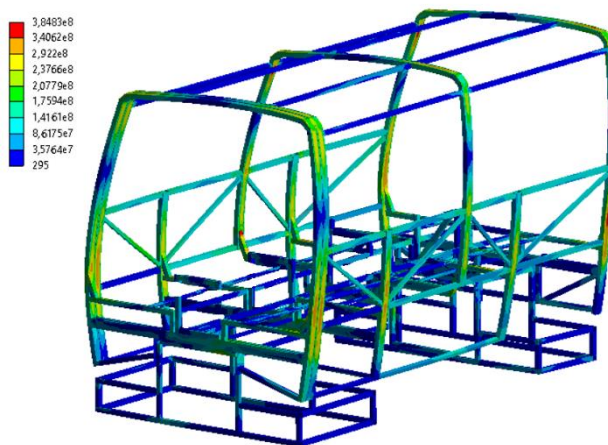
Konstrukcijos modelis sudarytas iš 26480 baigtinių elementų ir 54064 mazginių taškų naudojant paviršinius baigtinius elementus. Nagrinėjamas statinis uždavinys.

Atliekant konstrukcijos kompiuterinį modeliavimą, nustatyta, kad konstrukcijos viršutinis kairės pusės kampas betoninį pagrindą pasiekia po 1,58 sekundės, o kampo greitis smūgio į atramą metu yra 5,85 m/s.

Modeliavimo metu taip pat nustatyta, kad konstrukcijos kampinis greitis smūgio metu, į betoninį pagrindą, yra 2,12 rad/s.



2 pav. Konstrukcijos įlinkiai (plieninis karkasas), mm



3 pav. Įtempimų pasiskirstymas konstrukcijoje (plieninis karkasas), Pa

Hibridinio karkaso kompiuterinis modeliavimas

Hibridiniame karkase naudojamas plienas S235, kurio mechaninės nurodytos aukščiau ir stiklo pluošto, pultruzijos būdu pagaminto profilio mechaninės savybės:

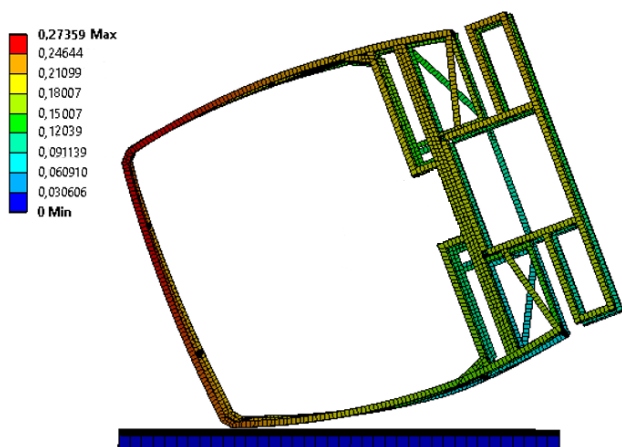
- tempimo riba – 360 MPa;
- lenkimo riba – 400 MPa;
- svoris (40x40x2, 1 metro ilgio) – 0,511 kg.

Konstrukcijos masė 544,7 kg.

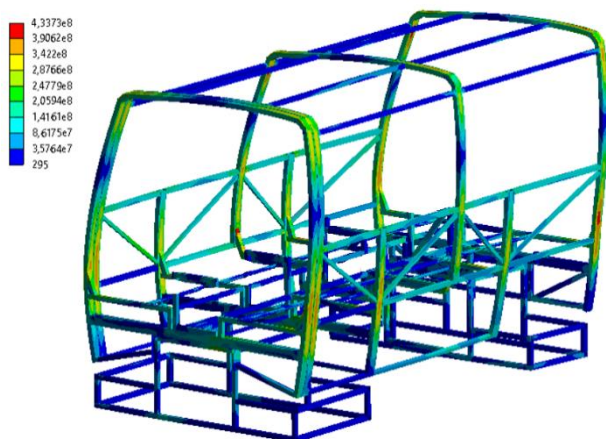
Konstrukcijos modelis sudarytas iš 26390 baigtinių elementų ir 54021 mazginių taškų naudojant paviršinius baigtinius elementus. Nagrinėjamas statinis uždavinys.

Atliekant hibridinės konstrukcijos kompiuterinį modeliavimą, nustatyta, kad konstrukcijos viršutinis kairės

pusės kampas betoninį pagrindą pasiekia po 1,47 sekundės, o kampo greitis smūgio į atramą metu yra 5,61 m/s. Modeliavimo metu taip pat nustatyta, kad konstrukcijos kampinis greitis smūgio metu, į betoninį pagrindą, yra 2,08 rad/s



4 pav. Konstrukcijos įlinkiai (hibridinis karkasas), mm

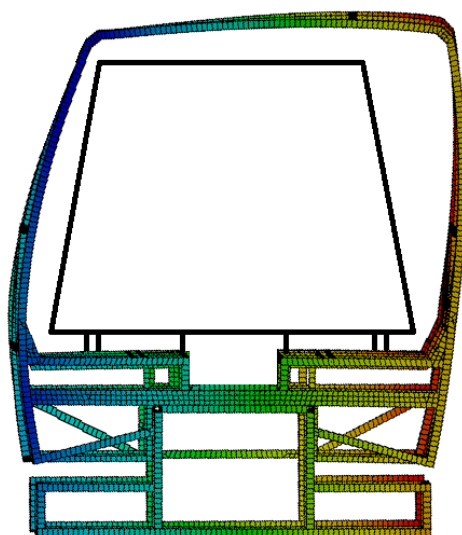


5 pav. Įtempimų pasiskirstymas konstrukcijoje (hibridinis karkasas), Pa

Atlikus skirtingų konstrukcijų modeliavimus, nustatyti labai nežymūs skirtumai tarp šių dviejų konstrukcijų. Metalinio karkaso didžiausias įlinkis siekia 0,185 m (žr. 2 pav.), o hibridinio – 0,27 m (žr. 4 pav.).

Vertinant įtempius, metalinio karkaso įtempiai siekia 384,8 MPa (žr. 3 pav.), hibridinio – 433,7 MPa (žr. 5 pav.).

Kadangi gauti įlinkių rezultatai skiriasi apie 1,4 % todėl atliekamas bendras saugios erdvės įvertinimas, kuris pavaizduotas 6 paveiksle.



6 pav. Saugios erdvės įvertinimas, po apsvertimo bandymo

Kaip matyti iš 6 paveikslo, nei viena konstrukcijos dalis nepatenka į saugos erdvę, todėl galima teigti, kad reikalavimas, kuris numatytas Jungtinių Tautų Europos ekonomikos komisijos (JT/EEK) Taisyklėje Nr. 66, yra įvykdytas. Autobuso karkasas užtikrina keleivių saugumą apsvertimo atveju.

Išvados

1. Išanalizavus mokslinius tyrimus ir publikacijas, susijusias su konstrukcijų kompiuteriniu modeliavimu, atliekant apsvertimo bandymą, matyti, kad visi bandymai atliekami su konstrukcijomis, kurios pagamintos iš vieno tipo medžiagos. Todėl šiame darbe modeliuojami iš skirtingų medžiagų sudarytos konstrukcijos.
2. Įvertinus konstrukcijos, sudarytos iš plieno ir konstrukcijos sudarytos iš plieno ir kompozitinės medžiagos įlinkius, matyti, kad plieninės konstrukcijos įlinkis yra tik 0,08848 m mažesnis nei hibridinės konstrukcijos.
3. Lyginant didžiausių įtempimų skirtumą, skirtumas tarp skirtingų konstrukcijų sudaro 48,9 MPa.
4. Atliekant saugios erdvės įvertinimą ir atsižvelgiant į tai, kad įlinkių skirtumas tarp skirtingų konstrukcijų siekia tik 1,4 % galima teigti, kad konstrukcija išlaikė apsvertimo bandymą.
5. Taikant hibridinio karkaso technologiją, autobuso masė sumažėtų apie 20 % (kompozito profilis, lyginant su plieniniu profiliu, yra 7 kartus lengvesnis). Tai užtikrintų saugesnį keleivių pervežimą, ekologinių ir ekonominių rodiklių gerinimą.
6. Hibridinio karkaso gamybos technologiją būtų galima pritaikyti ir krovinių automobilių antstatų gamybos pramonėje.

Literatūra

- Chirwa, E. C., Li, H., Qian, P. 2015. Modelling a 32-seat bus and virtual testing for R66 compliance. *International Journal of Crashworthiness*, (20)2: 200–209.
- Jeon, K.; Shin, K.; Kim, J. 2013. A study on evaluation of fatigue strength of a GFRP composite bogie frame for urban subway vehicles. *Advanced Composite Materials* 22(4): 213–225.

- Jungtinių Tautų Europos ekonomikos komisijos (JT/EEK) Taisyklė Nr. 66 „Suvienodintos didelių keleivinių kelių transporto priemonių patvirtinimo, atsižvelgiant į apkrovą laikančios šių priemonių kėbulų konstrukcijos stiprumą, nuostatos“ 2010. [žiūrėta 2018 m. vasario 2 d.]. Prieiga per internetą: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:42011X0330\(01\)&from=LT](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:42011X0330(01)&from=LT);
- Karlinski, J., Ptak, M., Dzialak, P., Rusinski, E. 2014. Strength analysis of bus superstructure according to Regulation No. 66 of UN/ECE. *Archive of civil and mechanical engineering*, 14: 342–353.
- Li, Z., Khennane, A., Hazell, P. J., Brown, A. D. 2017. Impact behaviour of pultruded GFRP composites under low-velocity impact loading. *Composite Structures*, 168: 360–371.
- Liu, Q.; Lin, Y.; Zong, Z.; Sun, G.; Li, Q. 2013. Lightweight design of carbon twill weave fabric composite body structure for electric vehicle. *Composite Structures* 97: 231–238.
- Yang, X.; Bai, Y.; Luo, F.J.; Zhao, X.; Ding, F. 2015. Dynamic and fatigue performances of a large-scale space frame assembled using pultruded GFRP composites. *Composite Structures* 138: 227–236.