

MIESTO TIPO AUTOMOBILIO PRIEKINĖS DEFORMACINĖS ZONOS TYRIMAS

Mantas LEONAVIČIUS, Vytauto Didžiojo Universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: mantas.leonavicius1@vdu.lt

Tomas MICKEVIČIUS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: tomas.mickevicius1@vdu.lt

Santrauka

Pasyvi transporto priemonių pasyvi yra viena svarbiausių šiuolaikinės automobilių inžinerijos uždavinių. Susidūrimo metu didelė dalis transporto priemonės kinetinės energijos turi būti sugerta deformacinėse zonos, siekiant sumažinti apkrovas, perduodamas keleiviams zonai. Energiją sugeriantis elementas yra transporto priemonės saugos sistemos komponentas, naudojamas kinetinei energijai paversti kita energijos forma, kuri išsklaidoma per plastinę deformaciją. Straipsnyje nagrinėjamas skirtingų medžiagų ir skirtingos formos sijos poveikis automobilio deformacinės zonos energijos sugėrimui smūgio metu. Tyrimo objektu pasirinkta originali plonasienė automobilio deformacinė sija. Skaitinis modeliavimas atliktas naudojant „Ansys Explicit Dynamics“ modulį. Geometriniai sijų modeliai buvo sukurti SolidWorks modeliavimo aplinkoje. Sukurti trimatės geometrijos modeliai eksportuoti ir įkelti į „ANSYS Mechanical“ programinę aplinką, kurioje buvo nustatyti pagrindiniai modeliavimo parametrai. Tyrimo metu vertintos reakcijos jėgos, sugertoji energija, deformacijos eiga ir apskaičiuota specifinė energija (SEA). Gauti rezultatai parodė, kad skirtinga sijos forma turi reikšmingą įtaką energijos sugėrimo pobūdžiui ir deformacijos tolygumui. Taip pat nustatyta, kad lengvesnės medžiagos, tokios kaip anglies pluoštas ir magnis, pasižymi didesnėmis specifinės sugertos energijos reikšmėmis, nors absoliuti sugerta energija kai kuriais atvejais yra mažesnė nei plieno konstrukcijose. Iš atlikto tyrimo galima daryti išvadą, kad deformacinių zonų konstrukcijos efektyvumą lemia ne tik naudojamos medžiagos mechaninės savybės, bet ir konstrukcijos geometrinė forma. Tinkamai parinkus sijos formą ir medžiagą galima pagerinti energijos sugėrimo efektyvumą bei sumažinti transporto priemonės konstrukcijos masę.

Reikšminiai žodžiai: modeliavimas, deformacija, sijos geometrinė konstrukcija, energija, pasyvi sauga.

Įvadas

Pagrindinė automobilių transporto paskirtis yra saugus, greitas ir patogus keleivių bei krovinių pervežimas. Siekiant sumažinti avarijų riziką, vis svarbesnę reikšmę įgauna aktyvusis ir pasyvus saugumas pagal sistemą žmogus-transporto priemonė-kelias-eismo aplinka. Tarp šių veiksnių neabejotinai dominuoja dvi pirmosios grandys – žmogus ir transporto priemonė. Pasyvi transporto priemonių sauga yra viena svarbiausių šiuolaikinės automobilių inžinerijos uždavinių. Susidūrimo metu didelė dalis transporto priemonės kinetinės energijos turi būti sugerta deformacinėse zonos, siekiant sumažinti apkrovas perduodamas keleiviams zonai (Juanedi et al., 2025). Energiją sugeriantis elementas yra transporto priemonės saugos sistemos komponentas, naudojamas kinetinei energijai paversti kita energijos forma, kuri išsklaidoma per plastinę deformaciją (ÖZEL et al., 2020). Kita energiją sugeriančių elementų funkcija – sumažinti didžiausią reakcijos jėgą, siekiant apsaugoti keleivius nuo rimtų sužalojimų susidūrimo metu (Demirci, Yildiz 2016). Dėl šios priežasties deformacinių konstrukcijų energijos sugėrimo savybės yra esminis kriterijus vertinant jų efektyvumą.

Deformacinėse automobilių zonos dažniausiai naudojamas konstrukcinis plienas dėl palyginti didelio stiprumo ir plastinio deformavimo gebėjimo. Tačiau kiekvienais metais, siekiant optimizuoti transporto priemonės masę ir degalų sąnaudas, vis didesnis dėmesys skiriamas lengvesnėms medžiagoms, ypač sportinio tipo automobiliams, taikant medžiagas kaip: aliuminis, magnis ar kompozitines medžiagas (Valayil, Issac, 2013). Šios medžiagos pasižymi mažesniu tankiu nei plienas, tačiau jų energijos sugėrimo pobūdis ir deformacijos elgsena smūgio metu skiriasi nuo įprastai naudojamų medžiagų, todėl būtina jas vertinti ne tik sugertos energijos, bet ir energijos sugėrimo efektyvumu masės atžvilgiu. Be medžiagos pasirinkimo, reikšmingą įtaką energijos sugėrimui turi ir geometrinė konstrukcijos forma. Skirtingas skerspjūvio konfigūravimas gali pakeisti deformacijos eigą, reakcijos jėgų pasiskirstymą ir sugertos energijos kiekį (Alomari, et al. 2013). Todėl tiriant energijos sugėrimą, reikia atsižvelgti ir į medžiagas ir į geometrinių parametru įtaką.

Darbe pateikiamas skaitinis deformacinės keturkampės ir šešiakampės sijos tyrimas, kuriame vienodomis smūgio sąlygomis vertinamas skirtingų medžiagų poveikis energijos sugėrimui. Toks tyrimo pobūdis leidžia tiesiogiai palyginti medžiagų ir konstrukcijos formos įtaką energijos sugėrimo efektyvumui bei deformacijos pobūdžiui.

Tyrimo tikslas – įvertinti skirtingos geometrijos priekinės automobilio deformacinės zonos sijos įtaką smūgio metu. Išskeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

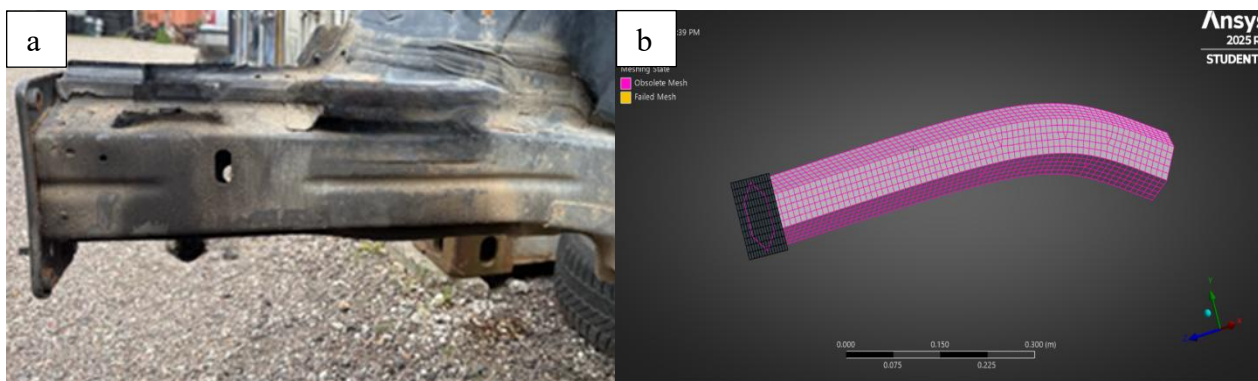
1. Sudaryti keturkampio ir šešiakampio formos deformacinių sijų skaitinius modelius.
2. Atlikti skaitines smūgio simuliacijas esant vienodoms apkrovimo sąlygomis skirtingoms medžiagoms.
3. Nustatyti ir palyginti skirtingų medžiagų ir sijos formų, sugertą energiją ir deformacijos eigą.

Tyrimų objektas ir metodai

Tyrimo objektu pasirinktas VW GOLF VII kartos priekinė deformacinė sija (žr. 1a pav.). Tokio tipo konstrukcinis elementas pasirinktas todėl, kad tokio tipo deformacinės sijos plačiai naudojamos daugumoje lengvųjų automobilių konstrukcijų, todėl jų konstrukcinių sprendimų tobulinimas gali turėti praktinę reikšmę automobilių saugumo didinimui. Siekiant įvertinti konstrukcijos geometrinės formos įtaką smūgio metu atsirandančioms apkrovoms, buvo suprojektuotas alternatyvus deformacinės sijos modelis. Nauja sija sukurta naudojant „SolidWorks“ modeliavimo programinę įrangą. Projektuojant alternatyvų modelį buvo išlaikyti pagrindiniai originalios sijos geometriniai matmenys, tačiau vietoje keturkampės skerspjūvio formos pritaikant šešių kampų formą (žr. 2b pav.).

1 lentelėje pateikti deformacinių sijų pradiniai geometriniai ir medžiagų parametrai. Abiejų sijų konstrukcinė elgsena visų pirma analizuojama naudojant gamyklinę medžiagą – plieną. Tokiu būdu nustatomi baziniai konstrukcijos parametrai ir jos elgsena smūgio metu, kurie vėliau naudojami kaip atskaitos taškas lyginant su kitomis nagrinėjamomis medžiagomis.

Skaitinis modeliavimas atliktas naudojant „Ansys Explicit Dynamics“ modulį. Geometriniai sijų modeliai buvo sukurti SolidWorks modeliavimo aplinkoje. Sukurti trimatės geometrijos modeliai eksportuoti ir įkelti į „ANSYS Mechanical“ programinę aplinką, kurioje buvo nustatyti pagrindiniai modeliavimo parametrai: konstrukcijos medžiaga, smūgio greitis, ribinės sąlygos ir atramos (žr. 2 pav.).



1 pav. VW GOLF VII priekinė deformacinė sija (a) ir suprojektuota šešiakampė deformacinė sija (b)

Fig.1. VW GOLF VII front deformation beam (a) and designed hexagonal deformation beam (b)

Medžiagų savybės parinktos remiantis automobilių pramonėje naudojamų medžiagų charakteristikomis ir moksliniuose tyrimuose pateikiamais duomenimis (Dange et al., 2015). Bandymuose buvo įvertintos alternatyvios medžiagos, kurios plačiai taikomos automobilių konstrukcijose: aliuminis, magnis ir anglies pluošto kompozitas. „Engineering Data“ skyriuje kiekvienai medžiagai modeliavimo aplinkoje priskiriamos atitinkamos mechaninės savybės.

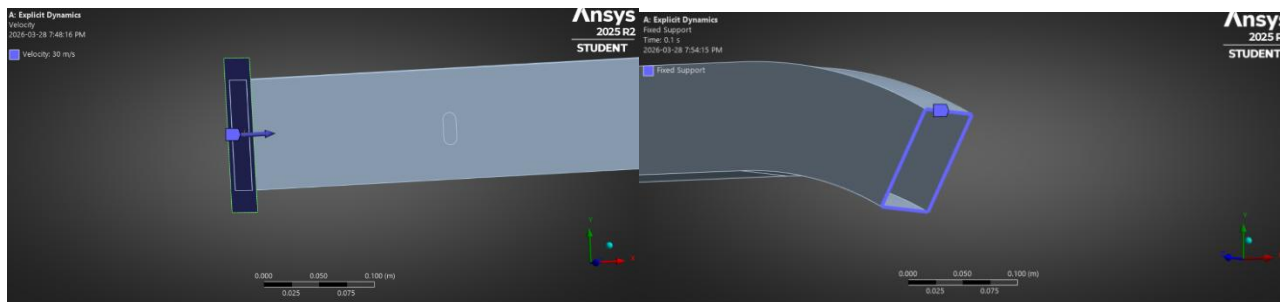
1 lentelė. Deformacinių sijų pradiniai parametrai

Table 1. Initial parameters of deformation beams

Sijos tipas <i>Deformation beam type</i>	Parametrai <i>Parameters</i>			
	Matmenys <i>Dimensions</i>	Medžiaga <i>Material</i>	Sienelių storis <i>Wall thickness</i>	Masė <i>Weight</i>
Keturkampė <i>Rectangular</i>	700x80x100 mm	Plienas <i>Steel</i>	2 mm	3,89 kg
Šešiakampė <i>Hexagonal</i>	700x86x100 mm	Plienas <i>Steel</i>	2 mm	2,79 kg

1 lentelėje pateikti abiejų sijų pagrindiniai parametrai. Realūs sijos matmenys išmatuoti ant tikros automobilio sijos, o šešiakampės matmenys pritaikyti taip, kad atitiktų automobilio realios sijos parametrus, žymiai jų nepakeičiant. Palyginimui ir skaičiavimams yra apskaičiuoti abiejų sijų skerspjūvio plotai ir gauta masė bei buvo gauta, kad šešiakampė užima mažesnę skerspjūvio plotą, todėl darė įtaką ir masei. Šešiakampė forma pasirinkta dėl galimo didesnio standumo, lengvumo ir mažo tyrimų atvejų, kurių atlikimas gali pagerinti automobilio pasyvios saugos konstrukciją (HUSSAIN, et al).

Smūgis modeliuotas kaip deformacinės sijos sąveika su standžia kliūtimi, o smūgio apkrova apibrėžta pradine konstrukcijos kinetine energija. Sijai priskirta smūgio kryptis su greičiu ir kitoje pusėje standi atrama (žr. 2 pav.). Smūgio greitis parinktas remiantis tipiniais automobilių saugos bandymuose naudojamais parametrais. Kontaktas tarp deformacinės sijos ir standžios kliūtis apibrėžtas kaip be trinties (*frictionless contact*). Skaičiavimo trukmė nustatyta 0,1 s, kad būtų užfiksuotas visas smūgio procesas nuo kontakto pradžios iki konstrukcijos deformacijos stabilizavimosi. Analizės metu vertinti pagrindiniai konstrukcijos atsako parametrai: ekvivalentinis įtempis (*von Mises*), kryptinė deformacija ir energijos sugėrimo kitimas smūgio metu.



2 pav. Modeliavimo parametrai, „Ansys“ platformoje
Fig. 2. Modelling parameters in the Ansys platform

Siekiant nustatyti deformacinės sijos energijos sugėrimo efektyvumą, buvo analizuojami šie rodikliai: bendras sugertos energijos kiekis, specifinė sugerta energija ir konstrukciniai sijos parametrai. Energijos sugėrimo vertinimui būtina nustatyti pradinę smūgio energiją, kuri lemia smūgio charakteristikas. Ši energija apskaičiuojama pagal mechanikoje taikomą formulę:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

čia,

m – judančio kūno masė (kg);

v – pradinis greitis (smūgio greitis m/s).

Sugerta energija nustatyta pagal simuliacijos pabaigoje gautą vidinės energijos reikšmę, kuri atspindi konstrukcijoje sukauptą plastinės ir tampriosios deformacijos energiją. Likusi nesugerta energija apskaičiuojama pagal formulę:

$$E_{likusi} = E_k - E_{vidinė} \quad (2)$$

čia,

E_k – pradinė kinetinė energija (J);

$E_{vidinė}$ – gauta sugerta energija (J).

Siekiant palyginti medžiagų ir konstrukcijų tipų efektyvumą smūgio metu, skaičiuojama specifinė sugertoji energija (SEA – Apecific Energy Absorption). Šis rodiklis apibrėžiamas kaip sugertos energijos ir konstrukcijos masės santykis. Mokslinio straipsnio autorius savo darbe apie energijų sugėrimo atsparumą smūgiams nurodo, kad specifinė sugertoji energija yra vienas pagrindinių parametru, leidžiančių lyginti skirtingų medžiagų konstrukcijas, nes ji įvertina tiek energijos sugėrimą, tiek konstrukcijos masę (Hwang, Han, 2024):

$$SEA = \frac{E_{sugerta}}{m} \quad (3)$$

čia,

$E_{sugerta}$ – sugertoji energija (J);

m – sijos masė (kg).

Analizuojant smūgio eigą buvo atsižvelgiama į konstrukcijos deformaciją su kiekviena tyrime naudota medžiaga ir sijos forma. Iš šio parametro buvo galima įvertinti, koku deformacijos gyliu buvo pasiekta sugertoji energija.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

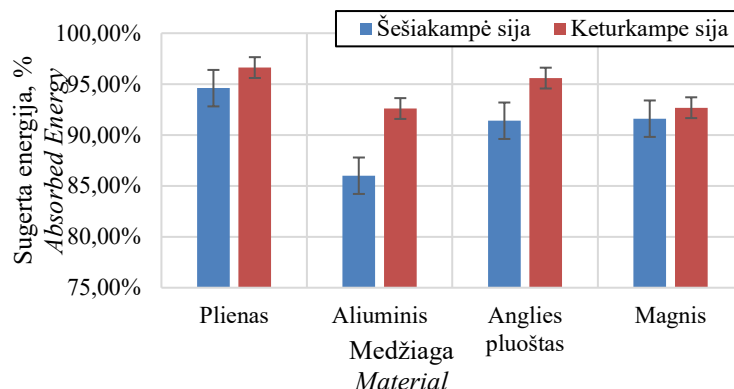
Atliekant simuliaciją būtina atsižvelgti į visas gaunamas energijas, nes tam tikrų energijos komponentų pokyčiai gali rodyti netinkamai nustatytus skaitinio modelio parametrus arba skaitinės analizės nestabilumą. Moksliniame darbe autorius teigia, kad energijos sugėrimo ir su tuo susijusių energetinių rodiklių analizė yra vienas svarbiausių kriterijų vertinant deformacinių konstrukcijų elgseną smūgio metu (Sa et al., 2022).

Tyrime sugerta energija buvo nustatyta pagal simuliacijos pabaigoje gautą vidinės energijos reikšmę. Ši energija atspindi konstrukcijoje sukauptą tampriosios ir plastinės deformacijos energiją, kuri susidaro konstrukcijai deformuojantis smūgio metu. Likusi nesugerta energija buvo apskaičiuojama pagal formulę (žr. 2 formulę), o gauti rezultatai pateikti 2 lentelėje.

Vertinant deformacinės sijos energijos sugėrimą buvo nustatyta pradinė smūgio energija. Analizės metu buvo vertinama, kuri medžiaga energijos sugėrimo požiūriu efektyvesnė, atsižvelgiant į tai, kad visoms medžiagoms buvo taikoma vienoda pradinė smūgio energija (žr. 1 formulę). Simuliacijos metu buvo stebimi pagrindiniai energijos komponentai: vidinė energija (*Internal Energy*), plastinis darbas (*Plastic Work*) ir kinetinė energija (*Kinetic Energy*). Šių energijos komponentų kitimas leidžia įvertinti konstrukcijos deformacijos procesą bei nustatyti, kokia smūgio energijos dalis yra sugeriama konstrukcijoje.

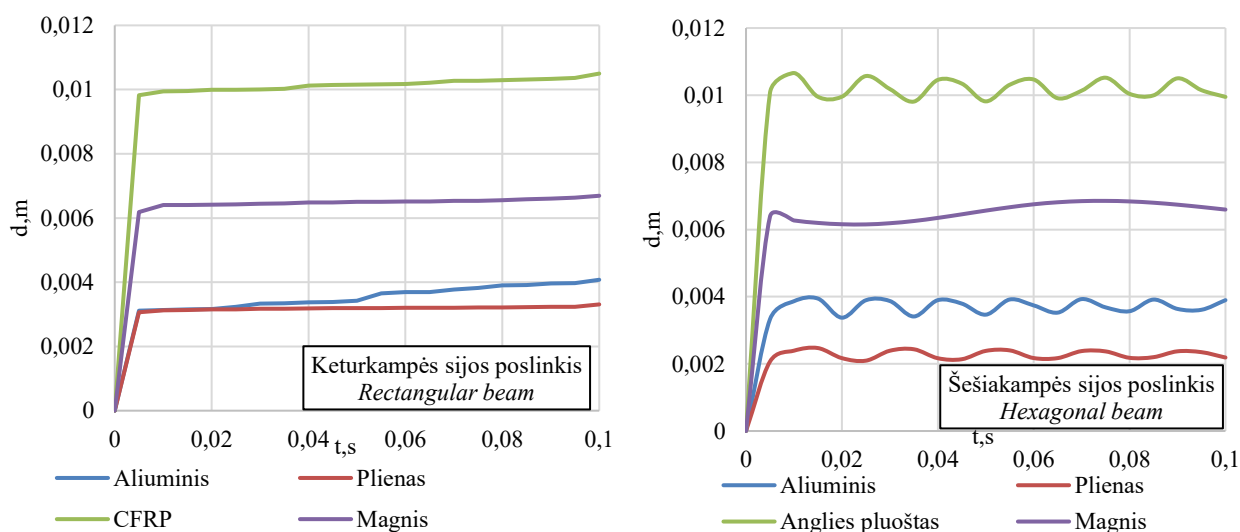
3 paveiksle pateiktas sugertos energijos palyginimas esant skirtingoms sijų formoms ir medžiagoms. Gauti rezultatai parodė, kad plieno atveju skirtingų formų sijos sugėrė nevienodą smūgio energijos kiekį: keturkampė sija sugėrė 96,6 %, o šešiakampė – 94,6 % pradinės energijos. Skirtumas tarp konstrukcijų sudaro apie 2 %, todėl nors jis nėra didelis, tačiau gali turėti reikšmės konstrukcijos deformacijos pobūdžiui. Vertinant kitas medžiagas pastebėta, kad energijos sugėrimo skirtumas tarp konstrukcijų tampa šiek tiek didesnis. Anglies pluošto atveju skirtumas siekia apie 4 %, aliuminio

– apie 6 %, o mažiausias skirtumas nustatytas magnio atveju – apie 1 %. Gauti skirtumai gali būti paaiškinami skirtingu konstrukcijų standumu ir deformacijos mechanizmais. Keturkampė sija pasižymi stabilesniu plastinės deformacijos vystymusi, todėl didesnė pradinės kinetinės energijos dalis paverčiama deformacijos energija. Tuo tarpu šešiakampėje konstrukcijoje deformacijos procesas vyksta mažiau stabiliai, todėl dalis energijos sunaudojama konstrukcijos poslinkiui ir lieka likutinės energijos pavidalu. Dėl didesnio konstrukcijos standumo dalis energijos perduodama už konstrukcijos ribų, todėl bendras sugertos energijos kiekis mažesnis.



3 pav. Sugertos energijos palyginimas skirtingoms sijų formoms ir medžiagoms
Fig. 3. Absorbed energy for different materials and beam shapes.

Medžiagos mechaninės savybės taip pat turi reikšmingą įtaką gautiems rezultatams. Aliuminio atveju didesnis energijos sugėrimo skirtumas tarp konstrukcijų nustatytas dėl mažesnio medžiagos standumo, todėl konstrukcijos deformacijos pobūdis labiau priklauso nuo geometrinės formos. Plieno ir anglies pluošto atveju abi medžiagos pasižymi didesniu standumu, tačiau jų deformacijos mechanizmai skiriasi. Plienas yra linkęs plastinei deformacijai, todėl yra mažiau jautrus konstrukcijos formos pokyčiams ir gali efektyviau sugerti smūgio energiją deformuodamasis. Tuo tarpu anglies pluoštas pasižymi dideliu standumu, tačiau yra trapesnė medžiaga. Nors dėl nepakankamos apkrovos konstrukcija visiškai nelūžta, tačiau gali atsirasti minimalūs mikro įtrūkimai, kurie mažina energijos sugėrimo efektyvumą.



4 pav. Keturkampės ir šešiakampės sijos poslinkis, esant skirtingoms medžiagoms
Fig. 4. Displacement graph of a rectangular and hexagonal beam

4 paveiksle pateiktas keturkampės ir šešiakampės sijos poslinkio grafikas, sijos poslinkis parodo, kiek sija deformavosi ir/ar sutrumpėjo smūgio metu. Iš gautų poslinkio rezultatų matyti, kad mažiausias poslinkis nustatytas plieno konstrukcijose ir siekia apie 0,002–0,003 m. Tuo tarpu didžiausias poslinkis nustatytas anglies pluošto konstrukcijose, kuriose abiejų sijų formų atveju poslinkis siekė apie 0,01 m. Tokie rezultatai siejami su medžiagų mechaninėmis savybėmis. Anglies pluoštas pasižymi dideliu standumu, tačiau yra trapesnė medžiaga, todėl smūgio metu gali atsirasti didesni poslinkiai ir konstrukcija greičiau praranda gebėjimą išlaikyti vientisumą. Aliuminio ir magnio konstrukcijų poslinkiai išliko tarpiniai – didesni nei plieno, tačiau mažesni nei anglies pluošto. Tai galima paaiškinti mažesniu šių medžiagų standumu ir greitesne deformacijos pradžia smūgio metu.

Keturkampės sijos atveju poslinkio kreivės pasižymi tolygesne eiga ir greitesniu stabilizavimusi po pirminio smūgio. Tai rodo pastovesnę deformacijos vystymąsi ir mažesnius dinامينius virpesius konstrukcijoje. Tuo tarpu šešiakampės sijos poslinkio kreivės pasižymi ryškesniais svyravimais. Tai galima paaiškinti sudėtingesne konstrukcijos geometrine forma ir nevienodu sienelių įlinkimu smūgio metu.

Dėl didesnio sienelių skaičiaus deformacija šešiakampėje konstrukcijoje vystosi nevienodu tempu, todėl atsiranda lokalių standumo pokyčių ir periodinių poslinkio svyravimų. Tačiau vertinant galutinius poslinkio rezultatus matyti, kad skirtumas tarp konstrukcijų nėra didelis. Tai rodo, kad sijos forma labiau veikia deformacijos eigą nei galutinę deformacijos dydį.

2 lentelė. Skirtingų medžiagų ir sijų formų sugerta energija

Table 2. Energy absorbed by different materials and beam shapes

	Medžiaga Material	Sugerta energija, J Absorbed Energy	Sugerta energija, % Absorbed Energy	Likusi energija, J Remaining Energy	Likusi energija, % Remaining Energy	Pradinė energija: 593,46 J Initial Energy
Keturkampė sija Rectangular Beam	Plienas Steel	573,36	96,62	20,1	3,38	
	Aluminis Aluminum	549,59	92,6	43,87	7,4	
	Anglies pluoštas Carbon Fiber	567,25	95,59	26,21	4,41	
	Magnis Magnesium	549,68	92,68	43,78	7,32	
Šešiakampė sija Hexagonal Beam	Medžiaga	Sugerta energija, J Absorbed Energy	Sugerta energija, % Absorbed Energy	Likusi energija, J Remaining Energy	Likusi energija, % Remaining Energy	
	Plienas	561,6	94,6	31,9	5,4	
	Aluminis	510,9	86	82,5	14	
	Anglies pluoštas	542,6	91,4	50,9	8,6	
	Magnis	543,9	91,6	49,6	8,4	

Sugertos energijos procentinė išraiška leidžia įvertinti konstrukcijos gebėjimą paversti pradinę kinetinę energiją deformacijos energija, tačiau ji neparodo energijos sugėrimo efektyvumo masės atžvilgiu. Kadangi lyginant skirtingas medžiagas siekiama mažinti transporto priemonės masę, papildomai apskaičiuojamas specifinės sugertos energijos rodiklis (*SEA* – *Specific Energy Absorption*), kurį apskaičiavus galima vertinti ir įdiegus sumažinti transporto priemonės masę. Taip pat šis rodiklis leidžia palyginti skirtingų medžiagų ir konstrukcijų formų energijos sugėrimo efektyvumą, atsižvelgiant į konstrukcijos masę.

Pagal 3 lentelėje pateiktus duomenis matyti, kad didžiausios specifinės sugertos energijos (*SEA*) reikšmės nustatytos anglies pluošto konstrukcijose – 727 ir 951 J/kg, tai rodo aukštą šios medžiagos energijos sugėrimo efektyvumą masės atžvilgiu. Aluminio ir magnio atvejais buvo nustatytos gerokai didesnės *SEA* reikšmės, palyginti su plienu. Šių medžiagų rezultatai abiejų sijų formų atveju siekia apie 400–850 J/kg. Tuo tarpu plieno, kuris yra originaliai naudojama medžiaga automobilio deformacinėse zonose, *SEA* reikšmės yra gerokai mažesnės ir siekia tik 148 ir 201 J/kg. Tai parodo, kad medžiagos tankis turi didelę įtaką energijos sugėrimo efektyvumui masės atžvilgiu – didesnio tankio medžiagos konstrukcija tampa sunkesnė, todėl norint sugerti tokį patį energijos kiekį reikalinga didesnė masė.

Šešiakampės konstrukcijos atveju *SEA* reikšmės visų medžiagų atvejais yra didesnės nei keturkampės sijos. Tai galima paaiškinti tuo, kad esant beveik vienodiems geometriniais matmenimis šešiakampė konstrukcija turi mažesnę skerspjūvio plotą, todėl konstrukcija tampa lengvesnė. Dėl mažesnės masės konstrukcija gali pasižymėti didesniu energijos sugėrimo efektyvumu, o tai prisideda prie didesnio ne tik deformacinės sijos, bet ir visos transporto priemonės konstrukcijos efektyvumo.

3 lentelė. *SEA* medžiagų ir formų rodiklis

Table 3. SEA materials and forms indicator

	Energija, J/kg (Vienas konstrukcijos kilogramas galintis sugerti energijos kiekį) Energy, J/kg (One kilogram of the structure can absorb the amount of energy)			
	Plienas Steel	Aluminis Aluminum	Anglies pluoštas Carbon Fiber	Magnis Magnesium
Keturkampė sija Rectangular Beam	148,1	413,2	727,2	624,6
Šešiakampė sija Hexagonal Beam	201,3	532,2	951,9	849,8

Apibendrinant galima teigti, kad deformacinių zonų konstrukcijos efektyvumą lemia ne tik naudojamos medžiagos mechaninės savybės, bet ir konstrukcijos geometrinė forma. Tinkamai parinkus sijos formą ir medžiagą galima pagerinti energijos sugėrimo efektyvumą bei sumažinti transporto priemonės konstrukcijos masę.

Išvados

1. Iš gautų tyrimo rezultatų galima teigti, kad plieno atveju, keičiant geometrinę formą, konstrukcijos sugėrė didžiąją dalį pradinės smūgio energijos – keturkampė sija apie 96,6 %, o šešiakampė apie 94,6 %.
2. Tyrimo metu buvo nustatyta, kad sijos geometrinė forma turi įtakos energijos sugėrimo pobūdžiui ir deformacijos eigai, keturkampė pasižymi stabilesne deformacija ir didesne sugertos energijos dalimi, šešiakampės sijos atveju deformacija turi ryškesnius dinامينius svyravimus, bet užtikrina didesnę energijos sugėrimą masės atžvilgiu.

3. Atlikus tyrimus buvo pastebėta, kad medžiagos savybės turi didelę įtaką konstrukcijos efektyvumui. Didžiausias energijos sugėrimo efektyvumas masės atžvilgiu nustatytas anglies pluošto konstrukcijoms (727–951 J/kg), aliuminio ir magnio rezultatai siekė apie 400–850 J/kg, o plieno konstrukcijų SEA buvo gerokai mažesnė – atitinkamai 148–201 J/kg.

4. Gauti poslinkio rezultatai parodė, kad mažiausi poslinkiai nustatyti plieno konstrukcijose (0,002–0,003 m), o didžiausi – anglies pluošto konstrukcijose (apie 0,01 m). Tai patvirtina, kad standesnės metalinės medžiagos geriau riboja konstrukcijos deformacijas, tačiau kompozitinės medžiagos gali pasižymėti didesniu energijos sugėrimo efektyvumu masės atžvilgiu.

Literatūra

1. Alomari, A., Aldajah, S., Hayek, S., Moustafa, K., & Haik, Y. (2013). Experimental investigation of the low-speed impact characteristics of nanocomposites. *Materials & Design*, 47, 836–841. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.057>
2. Christensen, J., Wilson, A., Bastien, C., & Kayvantash, K. (2023). Efficient crash structure design for road traffic accidents of tomorrow. *International Journal of Crashworthiness*, 28(5), 629–648. <https://doi.org/10.1080/13588265.2022.2033647>
3. Dange, M. V., Buktar, R. B., & Raykar, N. R. (2015). Design and analysis of an automotive front bumper beam for low-speed impact. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12(2), 17–27. <https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/>
4. Demirci, E., & Yildiz, A. R. (2016). Lightweight design of vehicle energy absorbers using steel, aluminum and magnesium alloys. In *Proceedings of the International Conference on Engineering and Natural Sciences* (pp. 1684–1691).
5. Hussain, N. N., Regalla, S. P., Rao, Y. V. D., Dirgantara, T., Gunawan, L., & Jusuf, A. (2021). Drop-weight impact testing for the study of energy absorption in automobile crash boxes made of composite material. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 235(1), 114–130. <https://doi.org/10.1177/1464420720952813>
6. Hwang, Y. H., & Han, J. H. (2025). Crashworthiness of energy absorbing structures under combined shear-compression loading: Effects of materials and geometries. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 26(2), 615–628. <https://doi.org/10.1007/s42405-024-00793-9>
7. Junaedi, H., Akkad, K., Khan, T., Abd El-Baky, M. A., Awd Allah, M. M., & Sebaey, T. A. (2025). Crashworthiness prediction of perforated foam-filled CFRP rectangular tubes crash box using machine learning. *Polymers*, 17(21), Article 2887. <https://doi.org/10.3390/polym17212887>
8. Özel, S., Karagöz, S., & Beytüt, H. (2020). Crashworthiness investigation of vehicle front bumper beam with different cross-sections under axial dynamic load. *European Journal of Technique*, 10(1), 97–105.
9. Prabhakaran, S. A., Balaji, G., & Annamalai, K. (2022). Numerical simulation of crashworthiness parameters for design optimization of an automotive crash-box. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, 13, Article 3. <https://doi.org/10.1051/smdo/2021036>
10. Valayil, T. P., & Issac, J. C. (2013). Crash simulation in ANSYS LS-DYNA to explore the crash performance of composite and metallic materials. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(8).

INVESTIGATION OF THE FRONT DEFORMATION ZONE OF A PASSENGER VEHICLE

Abstract

Passive safety of vehicles is one of the most important tasks of modern automotive engineering. During a collision, a large part of the vehicle's kinetic energy must be absorbed in the deformation zones to reduce the loads transmitted to the passenger compartment. An energy-absorbing element is a component of a vehicle's safety system used to convert kinetic energy into another form of energy, which is dissipated through plastic deformation. The article examines the effect of different materials and different shapes of beams on the energy absorption of the deformation zone of a vehicle during an impact. The original thin-walled deformation beam of a vehicle was chosen as the object of research. Numerical modelling was performed using the "Ansys Explicit Dynamics" module. Geometric models of beams were created in the SolidWorks modelling environment. The created three-dimensional geometric models were exported and loaded into the ANSYS Mechanical software environment, where the main modelling parameters were determined. During the study, reaction forces, absorbed energy, deformation course and calculated specific energy (SEA) were evaluated. The results obtained showed that the different shape of the beam has a significant impact on the nature of energy absorption and deformation uniformity. It was also found that lighter materials, such as carbon fibre and magnesium, are characterized by higher values of specific absorbed energy, although the absolute absorbed energy is in some cases lower than in steel structures. From the conducted study, it can be concluded that the efficiency of the design of deformation zones is determined not only by the mechanical properties of the material used, but also by the geometric shape of the structure. Proper selection of the shape and material of the beam can improve the efficiency of energy absorption and reduce the mass of the vehicle structure.

Key words: modelling, deformation, beam geometric design, energy, passive safety.