

Civil engineering  
Statybos inžinerija

SUDĖTINIO SKERSPJŪVIO PLIENINIŲ PLONASIENIŲ KOLONŲ  
SKERSPJŪVIO FORMŲ APŽVALGA

Mantas STULPINAS \*

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

Gauta 2022 m. gegužės 2 d.; priimta 2022 m. lapkričio 25 d.

**Santrauka.** Šio tyrimo tikslas – išnagrinėti sudėtinio skerspjūvio plieninių plonasienių kolonų surinkimo būdus, skerspjūvių formas ir formų parinkimo priežastis. Atliekant tyrimą išanalizuoti įvairių autorių eksperimentiniai tyrimai, atlikti su skirtingų ilgių ir formų sudėtinio skerspjūvio plieninėmis plonasienėmis kolonomis. Plonasienių kolonų sudėtinis skerspjūvis sudaromas jungiant du ar daugiau profiliuočius sienelėmis arba juostomis. Profiliuočiai gali būti jungiami ir netiesiogiai – naudojant tarpines plokšteles. Jungtys sudaromos savigrėžiais, varžtais, kniedėmis ar suvirinant lakštus. Profiliuočių jungimo žingsnis turi įtakos sudėtinio skerspjūvio laikomajai galiai: kai jungiami profiliuočiai be sąstandų, mažinant jungių žingsnį, gaunamas skerspjūvio sustiprėjimas iki 16 %; kai jungiami profiliuočiai su sąstandomis, mažinant jungių žingsnį, poveikis skerspjūvio laikomajai galiai yra nežymus ir kartais neigiamas. Išanalizuoti skirtingi skerspjūviai ir tarpusavyje palygintas jų efektyvumas – pastebėta, kad efektyvesnės yra didesnio skerspjūvio aukščio ir pločio kolonos, sudarytos iš profiliuočių su sienelių ir juostų sąstandomis – kolonų centriško gniuždymo laikomosios galios su plotu santykis gali būti iki 80 % didesnis sudėtinuose skerspjūviuose, suformuotuose naudojant profiliuočius su sąstandomis, lyginant su skerspjūviais, suformuotais iš profiliuočių be sąstandų.

**Reikšminiai žodžiai:** plieninės plonasienės konstrukcijos, sudėtinio skerspjūvio kolonos, apžvalga, eksperimentinių rezultatų analizė, klupumas, skerspjūvio surinkimas.

## Įvadas

Praėjusiame amžiuje pradėtų tyrinėti plieninių plonasienių elementų populiarumas ir naudojimo galimybės su metais tik auga. Plieninių plonasienių konstrukcijų, kaip kad lakštinių medžiagų, naudojimas laivyboje skatino tyrimų šioje srityje plėtrą, vėliau pradėtos tyrinėti ir kolonų bei sijų konstrukcijos, jų klupumas (Rhodes, 1997). Pastaraisiais metais atliekamų tyrimų su plieninėmis plonasienėmis konstrukcijomis atliekama itin įvairių – keičiant skerspjūvio formą (Leng et al., 2011), tyrinėjant skirtingas savybes skirtingomis sąlygomis, tyrinėjant mazgus, pagaminimo būdus ir pan., taip pat atliekant teorinius ir eksperimentinius tyrimus. Tačiau vienas svarbiausių tyrinėjimų aspektų – gautų rezultatų pritaikymas ir naudojimas. Mokslininkai ieško įvairių būdų, kaip paprasčiau ir pigiau pagaminti efektyvius konstrukcijų skerspjūvius – tai gali būti skerspjūvio lankstymas iš vientiso plieninio lakšto (Parastesh et al., 2019), sudėtinio skerspjūvio formavimas iš dviejų ar daugiau atskirų plieninių plonasienių elementų (Meza et al., 2020a, 2020b; Kherbouche & Megnounif,

2019) ar inovatyvus, origamio įkvėptas lankstymas (Shi et al., 2017).

Plieninių konstrukcijų skerspjūvį formuoti iš atskirų plonasienių elementų yra itin patogiu, nes tokiam skerspjūviui pagaminti gali būti naudojami standartiniai, rinkoje egzistuojantys plonasienių elementų gaminiai. Skerspjūvis gali būti gaunamas įvairių formų, todėl šio tyrimo tikslas – apžvelgti kitų mokslininkų atliktus eksperimentinius tyrimus su sudėtinio skerspjūvio plieninėmis plonasienėmis konstrukcijomis ir, analizuojant rezultatus, nustatyti, kokios buvo efektyvesnės skerspjūvio formos bei kodėl tos skerspjūvio formos buvo efektyvesnės.

## 1. Gniuždomųjų plieninių plonasienių konstrukcijų skaičiavimas

Plieninės plonasienės konstrukcijos yra sudėtingos konstrukcijos, nes jose pasireiškia išskirtiniai, įprastinėse konstrukcijose neegzistuojantys efektai. Pagal Europoje galiojančias projektavimo normas – Eurokodą 3 (The European

\*Autorius susirašinėti. El. paštas [mantas.stulpinas@vilniustech.lt](mailto:mantas.stulpinas@vilniustech.lt)

Committee for Standardization, 2006) plonasienės konstrukcijos yra tos, kurių skerspjūvio storis yra mažesnis negu 3 mm, tačiau šaltai lankstyti plieniniai plonasieniai skerspjūviai dažniausiai yra plonesni – vyrauja apie 1 mm storis. Tokie skerspjūviai priskiriami ketvirtai skerspjūvio klasei – gniuždomieji arba lenkiamieji. Jie, dar nepasiekę plieno takumo įtempių, išklumpa. Išskiriami trys klupumo atvejai – vietinis, iškreipiamasis ir bendrasis (lenkiamasis – sukamasis) klupumai. Pagal Eurokodą 3 vietinio klupumo sąlyga aprašoma efektyviuoju skerspjūvio plotu – prie skerspjūvio kampų ir sąstandų esantis skerspjūvio plotas yra efektyvus – jame nepasireiškia vietinis klupumas. Toliau nuo kampų esantis skerspjūvio plotas yra neefektyvus – jame pasireiškia vietinis klupumas ir yra laikoma, kad neefektyvi skerspjūvio dalis negali atlaikyti apkrovų poveikių. Plieninio plonasienio skerspjūvio gniuždymo laikomoji galia apskaičiuojama pagal (1) formulę:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (1)$$

čia  $A_{eff}$  – efektyvusis skerspjūvio plotas;  $f_y$  – plieno takumo stiprumas;  $\gamma_{M0}$  – dalinis patikimumo koeficientas, taikomas medžiagai.

Bendrasis plieninio plonasienio elemento klupumas įvertinamas atsižvelgiant į vietinį klupumą (analogiškai įvertinamas efektyvusis skerspjūvio plotas) ir sąlyginį liaunį:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}}, \quad (2)$$

čia  $\gamma_{M1}$  – dalinis elementų klupumo laikomosios galios koeficientas;  $\chi$  – atitinkamos klupumo formos klupumo koeficientas, priklausantis nuo nuokrypos koeficiento  $\alpha$  ir sąlyginio liaunio  $\bar{\lambda}$ . Sąlyginis liaunis apskaičiuojamas taip:

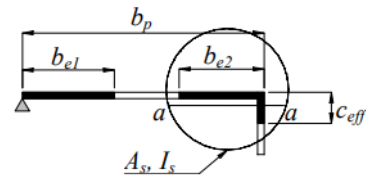
$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}, \quad (3)$$

čia  $N_{cr}$  – atitinkamos klupumo formos tamprioji kritinė jėga, pagrįsta bendrojo skerspjūvio savybėmis.

Iškreipiamasis plieninio plonasienio skerspjūvio klupumas pasireiškia skerspjūvio sienelės ir juostos pasisukimo vienas kito atžvilgiu. Ši klupumo forma priklauso nuo sienelės ir juostos jungties sukamojo standumo. Skaičiuojant skerspjūvio iškreipiamojo klupumo stiprumą, analizuojami plokštieji elementai su kampinėmis arba tarpinėmis sąstandomis. Šios sąstandos veikia kaip gniuždomieji elementai su dalinėmis atramomis. Dalinės atramos priklauso nuo lenkiamojo standumo ir gretimų plokščiųjų elementų. Dalinės atramos stiprumas nustatomas uždedant vienetinę apkrovą sąstandos vietoje. Dalinės atramos dydis nustatomas pagal formulę:

$$K = u / \delta, \quad (4)$$

čia  $u$  – vienutinė apkrova;  $\delta$  – sąstandos deformacija nuo vienetinės apkrovos  $u$ .



1 paveikslas. Efektyvusis sąstandos skerspjūvio plotas (Dubina et al., 2012)

Figure 1. Effective cross-section area of the stiffener (Dubina et al., 2012)

Skaičiuojant įtempius sąstandoje, įvertinami efektyvieji sąstandos skerspjūvio parametrai, pavaizduoti 1 paveiksle. Įtemptiai sąstandoje apskaičiuojami pagal šią formulę:

$$\sigma_{cr} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s}, \quad (5)$$

čia  $E$  – sąstandos tamprumo modulis;  $I_s$  – sąstandos efektyviojo skerspjūvio inercijos momentas;  $A_s$  – sąstandos efektyvusis skerspjūvio plotas.

Plonasienės gniuždomosios konstrukcijos laikomąją galią gali nulemti viena iš trijų laikomųjų galių, todėl svarbu elemento skerspjūvį parinkti atsižvelgiant į šias sąlygas.

Klumpančio skerspjūvio ploto dalies mažinimas yra ypač efektyvi priemonė siekiant didinti skerspjūvio laikomąją galią. Pavieniam plieniniam plonasieniui klumpamoji laikomoji galia gali būti didinama neefektyviose skerspjūvio zonose išlankstant arba privirinant sąstandas. Tačiau kai skerspjūvis formuojamas iš kelių elementų, jų išdėstymas gali būti parinktas atsižvelgiant į šias klumpančias skerspjūvio zonas. Atitinkamai klumpantys elementai gali būti parinkti storesni arba, jungiant vieną elementą į kito elemento neefektyvią zoną, sustiprinti šią zoną.

## 2. Sudėtinio skerspjūvio plieninių kolonų atskirų profilioočių jungimo būdai ir jų įtaka laikomajai galiai

Vienas paprastesnių optimalios ir pritaikomos plonasienės konstrukcijos formos pagaminimo būdų – skirtingų formų gavimas jungiant kelis skirtingus standartinius profilioočius. Tokie profilioočiai gali būti jungiami savigrėžiais, varžtais, kniedėmis ar suvirinant. Gali būti jungiami atskiri elementų skerspjūviai per visą ilgį arba jungiami atskiri profilioočiai su tarpinėmis jungtimis – plokštelėmis. Moksliniuose eksperimentiniuose tyrimuose dažniausias yra plieninių profilioočių jungimas – savigrėžiais arba varžtais – dėl surinkimo paprastumo.

Kai plieniniai profilioočiai jungiami savigrėžiais, varžtais ar kniedėmis, aktualus yra jungių išdėstymo žingsnis. Meza et al. (2020a) atliko sudėtinio skerspjūvio plieninių plonasienių kolonų eksperimentinius tyrimus, kai atskiri profilioočiai jungiami 333 arba 167 mm žingsniu. Kolonų ilgis – 1100 mm. Tirtos trys skirtingų skerspjūvių kolonos. Pirmas kolonos tipas (a) – du C formos profilioočiai, per juostas sujungti plieniniu lakštu, taip suformuojant

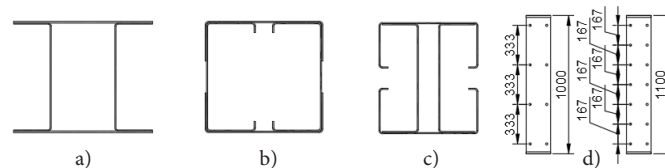
stačiakampį skerspjūvį su kampinėmis auselėmis. Antras kolonos tipas (b) – du C formos profiliuočiai su galinėmis sąstandomis, sujungti dviem C formos profiliuočiais, taip suformuojant kvadratinį skerspjūvį. Trečias kolonos tipas (c) – du C formos profiliuočiai, sujungti per juostas C formos profiliuočiais su galinėmis sąstandomis, taip suformuojant skerspjūvio formą, artimą dvitėjo skerspjūvio formai. Tirti skerspjūviai pavaizduoti 2 paveiksle. (a) tipo skerspjūvio kolonos, kuri suformuota iš profiliuočių be sąstandų, laikomoji galia padidėjo 11,4 %, kai jungių žingsnis sumažintas nuo 333 mm iki 167 mm. (b) tipo skerspjūvio kolonos, sudarytos iš daugiau lankstytų profiliuočių, laikomoji galia padidėjo tik 2,1 %, o (c) tipo skerspjūvio kolonos laikomoji galia sumažėjo 5,8 %.

Lyginant ilgesnio skerspjūvio tokias pačias kolonas (Meza et al., 2020b), pastebima analogiška tendencija. Meza et al. (2020b) ištyrė tokio paties sudėtinio skerspjūvio plienines plonasienes kolonas, kurių ilgis – 3000 mm. Kolonų skerspjūviai ir jungių išdėstymas pavaizduoti 3 paveiksle. (a) tipo kolonos laikomoji galia padidėjo 16,2 %, kai profiliuočių jungių žingsnis buvo sumažintas nuo 960 mm iki 320 mm. (b) ir (c) tipų skerspjūvio kolonų laikomoji galia sumažėjo atitinkamai 1,6 % ir 2,5 %. Pastebima, kad nagrinėjamu atveju jungių žingsnio sumažinimas turi teigiamą poveikį kolonų, sudarytų iš liaunų, mažai lankstytų profiliuočių, laikomajai galiai, tačiau skerspjū-

vių, sudarytų iš standesnių, daugiau lankstytų profiliuočių, laikomajai galiai turi mažą poveikį. Šis reiškinys gali būti paaiškintas tuo, kad, mažinant jungių žingsnį, mažėja vietinio klupumo pusbangės ilgis, todėl didėja skerspjūvio vietinio klupumo laikomoji galia. Mažesniu žingsniu sujungti profiliuočiai vienas kitą sustandina esant iškreipiamojo klupumo laikomajai galiai.

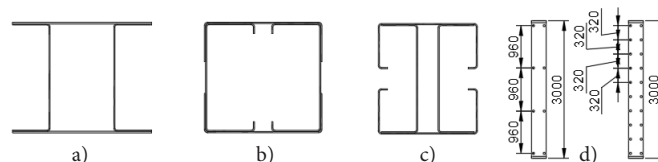
### 3. Sudėtinio skerspjūvio plieninių kolonų formos ir jų efektyvumas

Buvo išnagrinėti skirtingų autorių atlikti eksperimentiniai gniuždymo tyrimai su sudėtinio skerspjūvio plieninėmis plonasienėmis kolonomis. Šiame skyriuje pateikiama atliktų tyrimų analizė tarpusavyje lyginant skirtingų skerspjūvių efektyvumą. Yra logiška, kad didesnio skerspjūvio ploto kolona, sudaryta iš skerspjūvių su sąstandomis, turės didesnę laikomąją galią negu mažesnio skerspjūvio ploto kolona, sudaryta iš profiliuočių be sąstandų. Ieškant optimalios skerspjūvio formos, svarbu analizuoti skerspjūvyje naudojamų sąstandų efektyvumą. Svarbu patikrinti, ar laikomosios galios padidėjimas yra proporcingas skerspjūvio ploto padidėjimui, kai lyginamas skerspjūvis su sąstandomis ir skerspjūvis be sąstandų. Siekiant patikrinti, ar skerspjūvio laikomosios galios padidėjimas dėl skerspjūvyje naudojamų sąstandų yra proporcingas skerspjūvio



2 paveikslas. Plieninių plonasienių sudėtinio skerspjūvio kolonų laikomosios galios palyginimas, atsižvelgiant į jungių išdėstymo žingsnį, kai kolonų ilgis – 1100 mm. Skerspjūvių efektyvumas, kai jungės išdėstytos 333 mm žingsniu: (a) tipo – 100 %, (b) tipo – 132,4 %, (c) tipo – 141,0 %. Skerspjūvių efektyvumas, kai jungės išdėstytos 167 mm žingsniu: (a) tipo – 111,4 %, (b) tipo – 135,2 %, (c) tipo – 133,3 %, (d) – kolonos ilgis ir jungių išdėstymas (Meza et al., 2020a)

Figure 2. Comparison of the load bearing capacity of the thin-walled cross-section columns, taking into account the spacing of the connectors, when the column length is 1100 mm. The effectiveness of the cross-section when the connector spacing is 333 mm: type (a) – 100%, type (b) – 132.4%, type (c) – 141.0%; when the connector spacing is 167 mm: type (a) – 111.4%, type (b) – 135.2%, type (c) – 133.3%. Figure (d) – the length of the column and the spacing of the connectors (Meza et al., 2020a)



3 paveikslas. Plieninių plonasienių sudėtinio skerspjūvio kolonų laikomosios galios efektyvumo palyginimas, atsižvelgiant į jungių išdėstymo žingsnį, kai kolonų ilgis – 3000 mm. Skerspjūvių efektyvumas, kai jungės išdėstytos 960 mm žingsniu: (a) tipo – 100 %, (b) tipo – 179,4 %, (c) tipo – 173,5 %. Skerspjūvių efektyvumas, kai jungės išdėstytos 320 mm žingsniu: (a) tipo – 116,2 %, (b) tipo – 176,5 %, (c) tipo – 169,1 %, (d) – kolonos ilgis ir jungių išdėstymas (Meza et al., 2020b)

Figure 3. Comparison of the load bearing capacity of the thin-walled cross-section columns, taking into account the spacing of the connectors, when the column length is 3000 mm. The effectiveness of the cross-section when the connector spacing is 960 mm: type (a) – 100%, type (b) – 179.4%, type (c) – 173.5%; when the connector spacing is 320 mm: type (a) – 116.2%, type (b) – 176.5%, type (c) – 169.1%. Figure (d) – the length of the column and the spacing of the connectors (Meza et al., 2020b)

ploto padidėjimui, šiame straipsnyje siūloma įvesti santykinį dydį  $E_x$ , kuris apskaičiuojamas:

$$E_x = \frac{R_{exp}}{A_s}, \quad (6)$$

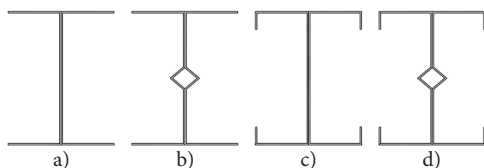
čia  $E_x$  – skerspjūvio efektyvumą išreiškiantis menamas dydis;  $R_{exp}$  – skerspjūvio eksperimentinė gniuždymo laikomoji galia, kN;  $A_s$  – tiriamo skerspjūvio plotas, mm<sup>2</sup>.

Naudojant efektyvumo nustatymo išraišką (6), galima palyginti ne tik vieno autoriaus tiriamus skerspjūvius tarpusavyje, bet ir palyginti su kitų autorių ištirtais skerspjūviais. Tačiau palyginimai turi būti atlikti atsižvelgiant į kitas specifikas – bandinio ilgį, naudojamą bandinių plieno stiprumą. Šiame tyrime toks palyginimas tarp autorių nebuvo atliktas, nes eksperimentinių sudėtinio skerspjūvio plieninių plonasienių kolonų tyrimų, atliktų identiškomis sąlygomis, yra itin maži.

Ekspertinio tyrimo skirtingos kolonos tarpusavyje lyginamos procentine išraiška, kur 100 % atitinka pirmojo skerspjūvio apskaičiuotą efektyvumą. Kai procentinė išraiška yra didesnė negu 100 %, yra laikoma, kad skerspjūvis yra efektyvesnis negu pradinis skerspjūvis (laikomosios galios su skerspjūvio plotu santykis yra didesnis).

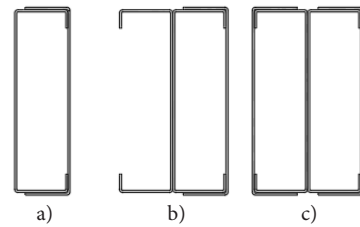
Deepak et al. (2020) ištyrė 300 mm ilgio kolonas, kurių skerspjūviai suformuoti jungiant du C formos profiliuočius per sienelės – taip suformuojant dvitėjo formos skerspjūvį. Skerspjūvių formos pateiktos 4 paveiksle. (a) tipas suformuotas jungiant profiliuočius be sąstandų, (b) tipas suformuotas jungiant profiliuočius su sąstanda sienelėje, (c) tipas suformuotas jungiant profiliuočius su kraštinėmis sąstandomis, (d) tipas – jungiant profiliuočius su sąstanda sienelėje ir su kraštinėmis sąstandomis. Gauta, kad mažiausiai efektyvus buvo (a) tipo skerspjūvis – be sąstandų. (b) tipas buvo 13,2 %, (c) tipas – 20,1 %, (d) tipas – 28,5 % efektyvesni už (a) tipą. Autoriai tyrinėjo ir skerspjūvius, sudarytus iš profiliuočių su klostinėmis sąstandomis tarp sienelės ir juostos, tačiau nurodė, kad tokios sąstandos yra neefektyvios.

Liao et al. (2017) ištyrė 450 mm ilgio kolonas, kurių skerspjūviai suformuoti jungiant skirtingą kiekį C formos profiliuočių, taip suformuojant uždarąjį skerspjūvį. Skerspjūvių formos pateiktos 5 paveiksle. (a) tipas sufor-



4 paveikslas. Plieninių plonasienių sudėtinio skerspjūvio kolonų laikomosios galios efektyvumo palyginimas, kai kolonų ilgis – 300 mm: (a) tipo – 100 %, (b) tipo – 113,2 %, (c) tipo – 120,1 %, (d) tipo – 128,5 % (Deepak et al., 2020)

Figure 4. Comparison of the load bearing capacity of the thin-walled cross-section columns when the column length is 300 mm: type (a) – 100%, type (b) – 113.2%, type (c) – 120.1%, type (d) – 128.5% (Deepak et al., 2020)

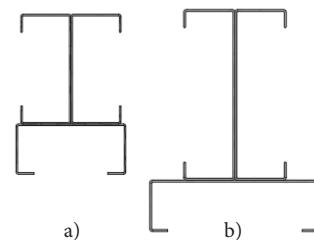


5 paveikslas. Plieninių plonasienių sudėtinio skerspjūvio kolonų laikomosios galios efektyvumo palyginimas, kai kolonų ilgis – 450 mm: (a) tipo – 100 %, (b) tipo – 98,3 %, (c) tipo – 106,3 % (Liao et al., 2017)

Figure 5. Comparison of the load bearing capacity of the thin-walled cross-section columns when the column length is 450 mm: type (a) – 100%, type (b) – 98.3%, type (c) – 106.3% (Liao et al., 2017)

muotas jungiant du C formos profiliuočius juostomis ir taip sudarant dėžinį skerspjūvį, (b) tipas – prie (a) tipo skerspjūvio šono jungiant dar vieną C formos profiliuotį ir (c) tipas – sujungiant du (a) tipo skerspjūvius kartu. Skerspjūvio efektyvumas buvo panašus visuose skerspjūvio tipuose: (a) tipo – 100 %, (b) tipo – 98,3 %, (c) tipo – 106,3 %. Visų trijų skerspjūvių laikomosios galios su skerspjūvio plotu santykis buvo panašus – neviršijo paklaidos. Skerspjūvio, sudaryto iš keturių C formos profiliuočių, laikomosios galios su plotu santykis buvo gautas didžiausias. Skerspjūvių efektyvumas skyrėsi nežymiai todėl, kad (a) ir (c) tipo profiliai pasiekė laikomosios galios limitą dėl vietinio klupumo ilgoje sienelėje, o (b) tipo skerspjūvis – dėl vietinio klupumo ilgoje sienelėje bei iškreipiamą klupumą atskiro C profiliuoties juostose. Papildomų C profiliuočių su liauna sienele pridėjimas nesusistandino skerspjūvio tiek, kad būtų pasiektas žymesnis vietinio klupumo laikomosios galios sustiprėjimas.

Liu ir Zhou (2017) ištyrė 3030 mm ilgio kolonas, kurių skerspjūviai suformuoti iš įvairių dydžių C formos profiliuočių, taip suformuojant dvitėjo formos skerspjūvį su pastiprinta juosta. Skerspjūvių formos pateiktos 6 paveiksle. (a) ir (b) tipai suformuoti analogiškai, tačiau naudojant skirtingo dydžio profiliuočius. Gauta, kad efektyvesnis skerspjūvis buvo (b) tipo, kuris suformuotas iš aukštesnių C formos profiliuočių – yra platesnio skerspjūvio. (a) tipo skerspjūvio efektyvumas buvo 100 %, (b) tipo – 124,4 %.

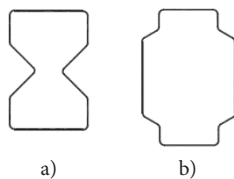


6 paveikslas. Plieninių plonasienių sudėtinio skerspjūvio kolonų laikomosios galios efektyvumo palyginimas, kai kolonų ilgis – 3030 mm: (a) tipo – 100 %, (b) tipo – 124,4 % (Liu & Zhou, 2017)

Figure 6. Comparison of the load bearing capacity of the thin-walled cross-section columns when the column length is 3030 mm: type (a) – 100%, type (b) – 124.4% (Liu & Zhou, 2017)



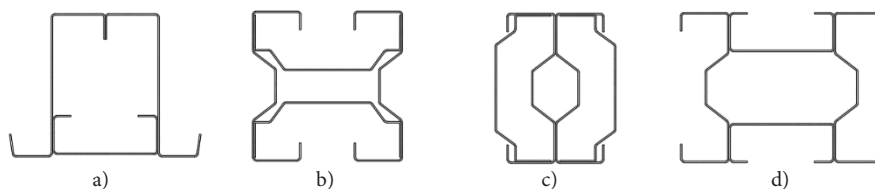
Zhang ir Young (2018) ištyrė 3200 mm ilgio kolonas, kurių skerspjūviai sudaryti iš modifikuotų C formos profiliuotųjų, taip suformuojant uždarojo skerspjūvio kolonas su sąstandomis sienelėse, išlenktomis į skerspjūvio vidų arba išorę. Skerspjūvių formos pateiktos 7 paveiksle. (a) tipo skerspjūvis buvo suformuotas su sąstandomis, išlenktomis į skerspjūvio vidų, jo efektyvumas prilygintas 100 %. (b) tipo skerspjūvis buvo suformuotas su sąstandomis, išlenktomis į išorę, jis buvo efektyvesnis už (a) tipo skerspjūvį. (b) tipo skerspjūvio efektyvumas siekė 126,6 %. Autoriai nelygina skirtingų skerspjūvių laikomųjų galių tarpusavyje, todėl sunku įvertinti, kodėl (b) tipo skerspjūvis buvo efektyvesnis. Abiejų skerspjūvių laikomoji galia buvo pasiekta dėl kombinuoto vietinio ir lenkiamojo klumpumų modų. (b) tipo skerspjūvis yra didesnio inercijos momento, turi daugiau sąstandų. Tikėtina, kad šios priežastys lėmė didesnę skerspjūvio efektyvumą.



7 paveikslas. Plieninių plonasienių sudėtinio skerspjūvio kolonų laikomosios galios efektyvumo palyginimas, kai kolonų ilgis – 3200 mm: (a) tipo – 100 %, (b) tipo – 126,6 % (Zhang & Young, 2018)

Figure 7. Comparison of the load bearing capacity of the thin-walled cross-section columns when the column length is 3200 mm: type (a) – 100%, type (b) – 126.6% (Zhang & Young, 2018)

Georgieva et al. (2012) ištyrė 3000 mm ilgio kolonas, kurių skerspjūviai sudaryti iš įvairių formų profiliuotųjų, formuojant nestandartines uždarojo, uždarojo bei atvirojo skerspjūvio kolonas. Skerspjūvių formos pateiktos 8 paveiksle. (a) tipo skerspjūvis buvo suformuotas iš C ir Z formos profiliuotųjų, sudarant uždarąjį skerspjūvį. (b) tipo skerspjūvis buvo suformuotas iš sigma ir C formos profiliuotųjų, sudarant formą, artimą dvitėjam skerspjūviui. (c) tipo skerspjūvis buvo suformuotas iš sigma ir C formos profiliuotųjų, sudarant uždarąjį skerspjūvį. (d) tipo skerspjūvis buvo suformuotas iš sigma ir C formos profiliuotųjų, sudarant pusiau atviro, pusiau uždaro skerspjūvio koloną. Skerspjūvių efektyvumas labai stipriai skyrėsi – iki 2,37 karto. Efektyviausi buvo platesni, hibridiniai užda-



8 paveikslas. Plieninių plonasienių sudėtinio skerspjūvio kolonų laikomosios galios efektyvumo palyginimas, kai kolonų ilgis – 3000 mm: (a) tipo – 100 %, (b) tipo – 236,5 %, (c) tipo – 101,9 %, (d) tipo – 215,4 % (Georgieva et al., 2012)

Figure 8. Comparison of the load bearing capacity of the thin-walled cross-section columns when the column length is 3000 mm: type (a) – 100%, type (b) – 236.5%, type (c) – 101.9%, type (d) – 215.4% (Georgieva et al., 2012)

rosios ir atvirosios formos skerspjūviai (b) ir (d) tipo. Jų efektyvumas buvo atitinkamai 236,5 % ir 215,4 %. Mažiausiai efektyvūs buvo atvirosios formos skerspjūviai (a) ir (c). Jų efektyvumas buvo atitinkamai 100 % ir 101,9 %. Tyrimo rezultatai iliustruoja, kad kolonos laikomoji galia gali stipriai skirtis priklausomai nuo to, kokia skerspjūvio forma parinkta sujungiant profiliuotuosius. (b) ir (c) tipo skerspjūviai yra sudaryti iš identišκών profiliuotųjų, tačiau surinkti į skirtingą skerspjūvio formą. (b) tipo kolonos laikomoji galia yra 2,3 karto didesnė negu (c) tipo kolonos. Autoriai apskaičiavo skerspjūvių vietinio, iškreipiamojo ir bendrojo klumpumų įtempius. Gauta, kad (b) tipo kolonos vietinio ir iškreipiamojo klumpumo įtempiai buvo mažesni, bet bendrojo klumpumo įtempiai, kurie ir turėjo lemiamą įtaką, (b) tipo skerspjūvio buvo 4,5 karto didesni.

Meza et al. (2020a, 2020b) ištyrė 1100 mm ir 3000 mm ilgio kolonas, kurių skerspjūviai aptarti antrame skyriuje. 1100 mm ilgio kolonų skerspjūviai ir jų efektyvumas pateiktas 2 paveiksle, 3000 mm ilgio kolonų – 3 paveiksle. Gauta, kad abiejų ilgių mažiausiai efektyvūs kolonos tipas buvo (a) – skerspjūvis be sąstandų. (b) ir (c) tipų efektyvumai buvo panašūs. 1100 mm ilgio kolonos efektyviausias buvo (c) tipo skerspjūvis, 3000 mm ilgio kolonos – (b) tipo skerspjūvis.

Išnagrinėtos įvairaus ilgio ir formos sudėtinio skerspjūvio plieninės plonasienės kolonos. Atlikti tyrimai parodė, kad sudėtinio skerspjūvio surinkimo galimybės yra plačios, o paties skerspjūvio forma turi didelę įtaką kolonos laikomajai galiai. Egzistuoja daug galimybių parinkti naujas, efektyvesnes skerspjūvio formas, tačiau tam reikia spręsti skerspjūvio optimizacijos uždavinį.

## Išvados

Plieninės plonasienės sudėtinio skerspjūvio kolonos komponuojamos iš statyboje naudojamų plonasienių profiliuotųjų, juos jungiant savigręžiais, varžtais, kniedėmis ar suvirinant. Gali būti jungiami du ar daugiau ištisu skerspjūvių tarpusavyje arba gali būti skerspjūviai, sujungti tarpinėmis plokštelėmis.

Šiame tyrime pasiūlytas centriškai gniuždomų plieninių plonasienių kolonų skerspjūvio efektyvumo kriterijus leidžia palyginti skirtingų skerspjūvių kolonas ir nustatyti skerspjūvių efektyvumą veikiančius veiksnius. Kolonų

skerspjuvių efektyvumas priklauso nuo skerspjuvio formos, dydžio, profiliuočių tarpusavio jungimo būdo.

Tyrime nagrinėti skirtingų autorių atlikti eksperimentiniai centriškai gniuždomų plonasienių kolonų tyrimai parodė, kad efektyvesni buvo skerspjuviai, sudaryti iš profiliuočių su vidinėmis ir kraštinėmis sąstandomis. Plieninės plonasienės sudėtinio skerspjuvio kolonos, surinktos iš plonasienių profiliuočių su vidinėmis ir kraštinėmis sąstandomis, centriško gniuždymo laikomosios galios santykis su plotu gali būti iki 80 % didesnis, lyginant su plieninėmis plonasienėmis kolonomis, surinktomis iš plonasienių profiliuočių be sąstandų.

Kai plonasienę sudėtinio skerspjuvio koloną sudaro profiliuočiai su sąstandomis, atstumas tarp skerspjuvio tvirtinimo jungių didelės įtakos neturi. Kai jungiami profiliuočiai be sąstandų, jungių parinkimo žingsnis turi didesnę efektą kolonos laikomajai galiai. Šis efektas analizuotais atvejais buvo iki 16 %.

Šiame tyrime išnagrinėti kitų autorių įvairūs sudėtinio skerspjuvio plieninių plonasienių kolonų centriško gniuždymo eksperimentiniai tyrimai parodė, kad yra plačių galimybių parinkti skirtingas skerspjuvio formas. Skerspjuviai buvo sudaromi iš dviejų, trijų ar keturių profiliuočių, juos jungiant ties skerspjuvio sienelėmis ar juostomis.

## Literatūra

- Dubina, D., Ungureanu, V., & Landolfo, R. (2012). *Design of cold-formed steel structures*. John Wiley & Sons.  
<https://doi.org/10.1002/9783433602256>
- Deepak, M. S., Ananthi, G. B. G., & Mahendran, K. (2020). Behaviour of thin-walled intermediate stiffened back-to-back columns under axial compression. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 2145–2152.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.575>
- Georgieva, I., Schueremans, L., Vandewalle, L., & Pyl, L. (2012). Design of built-up cold-formed steel columns according to the direct strength method. *Procedia Engineering*, 40, 119–124.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.066>
- Kherbouche, S., & Megnounif, A. (2019). Numerical study and design of thin walled cold formed steel built-up open and closed section columns. *Engineering Structures*, 179, 670–682.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.069>
- Leng, J., Guest, J. K., & Schafer, B. W. (2011). Shape optimization of cold-formed steel columns. *Thin-Walled Structures*, 49(12), 1492–1503. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.07.009>
- Liao, F., Wu, H., Wang, R., & Zhou, T. (2017). Compression test and analysis of multi-limbs built-up cold-formed steel stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 128, 405–415.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.09.005>
- Liu, X., & Zhou, T. (2017). Research on axial compression behavior of cold-formed triple-limbs built-up open T-section columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 134, 102–113.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.03.015>
- Meza, F. J., Becque, J., & Hajirasouliha, I. (2020a). Experimental study of cold-formed steel built-up columns. *Thin-Walled Structures*, 149, 106291.  
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106291>
- Meza, F. J., Becque, J., & Hajirasouliha, I. (2020b). Experimental study of the cross-sectional capacity of cold-formed steel built-up columns. *Thin-Walled Structures*, 155, 106958.  
<https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106958>
- Parastesh, H., Hajirasouliha, I., Taji, H., & Bagheri Sabbagh, A. (2019). Shape optimization of cold-formed steel beam-columns with practical and manufacturing constraints. *Journal of Constructional Steel Research*, 155, 249–259.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.12.031>
- Rhodes, J. (1997). Research into Thin-Walled Structures at the University of Strathclyde—a brief history. *Thin-Walled Structures*, 28(3–4), 201–212.  
[https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(97\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(97)00041-4)
- Shi, Q., Shi, X., Gattas, J. M., & Kitipornchai, S. (2017). Folded assembly methods for thin-walled steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 138, 235–245.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.07.010>
- The European Committee for Standardization. (2006). *Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1–3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting* (EN 1993-1-3). <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1993.1.3.2006.pdf>
- Zhang, J. H., & Young, B. (2018). Experimental investigation of cold-formed steel built-up closed section columns with web stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research*, 147, 380–392.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.04.008>

## A REVIEW OF THIN-WALLED BUILT-UP CROSS-SECTION ASSEMBLIES

M. Stulpinas

Abstract

The goal of this research is to review the methods of assembly of the thin-walled built-up cross-sections, cross-section shapes and shape selection reasons. Different author's experimental studies of the thin-walled built-up cross-sections of various lengths and shapes have been reviewed. The cross-section of the thin-walled built-up columns is assembled by connecting two or more profiles at their webs or flanges. The cross-section can be assembled indirectly – by using intermediate plates. The connections of the profiles and plates can be self-drilling screws, bolts, rivets or welds. The step of the thin-walled profile connections has an impact to the load bearing resistance of the cross-section. The increase to the load bearing capacity of the cross-section can be up to 16% when profiles without stiffeners are connected with a smaller connection step. The effect to the load bearing resistance of the decrease of the connection step length of the thin-walled cross-sections made of profiles with stiffeners was insignificant and sometimes unfavourable. Different cross-sections were analysed, and their effectiveness was compared. The more effective were cross-sections with a higher cross-section height and width, assembled of profiles with web and flange stiffeners. The ratio of the strength of the axial compression to the cross-section area of the built-up columns can be up to 80% higher when built-up cross-section is assembled using profiles with stiffeners, compared to the built-up cross-sections assembled using profiles without stiffeners.

**Keywords:** thin-walled structures, built-up columns, overview, experimental result analysis, buckling, cross-section assembly.