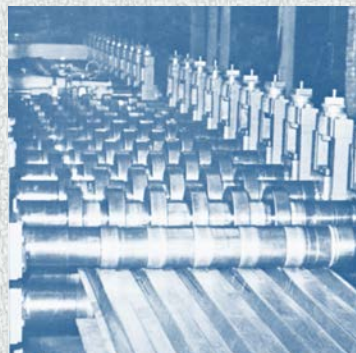




Alfonas DANIŪNAS

PLONASIENĖS METALINĖS KONSTRUKCIJOS



VG TU leidykla TECHNIKA

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Alfonsas DANIŪNAS

PLONASIENĖS METALINĖS KONSTRUKCIJOS

Mokomoji knyga

VG TU leidykla **TECHNIKA**
Vilnius

UDK 624.01(075.8)

Da255

A. Daniūnas. Plonasienės metalinės konstrukcijos: mokomoji knyga.

Atnaujinta laida. Vilnius: Technika, 2012. 104 p.

Mokomojoje knygoje pateikiama plonasienių, šaltai suformuotų elementų ir lakštų skaičiavimo teorija bei jų projektavimo metodika pagal standartą Eurokodas 3. Knygoje pateikiamas plonasienių elementų ir lakštų apibūdinimas, jų skaičiavimo specifiška, kuri atsiranda dėl elemento lakštų didelio pločio ir storio santykio. Daug dėmesio skiriama plonasienių elementų stabilumui suprasti ir skaičiuoti, nes tai daugiausia lemia sėkmingą šių elementų projektavimą.

Knygoje taip pat pateikiamas trumpas šaltai suformuotų elementų ir lakštų gamybos būdų aprašymas bei jų taikymas pastatų ir statinių plieninėms konstrukcijoms projektuoti.

Mokomoji knyga skirta statybos inžineriją studijuojantiems magistrantams ir besispecializuojantiems modernių plieninių konstrukcijų projektavimo srityje. Knyga taip pat naudinga konstruktoriams praktikams.

Leidinyi parengtas ir išleistas už Europos socialinio fondo lėšas vykdant projektą „Transporto ir civilinės inžinerijos sektorių mokslo, verslo ir studijų integralumo didinimas (TRANCIV)“, VP1-2.2-ŠMM-09-V-01-008.

Recenzentai: prof. dr. Romualdas Kliukas, Medžiagų atsparumo katedra, VGTU
prof. dr. Algirdas Juozapaitis, Tiltų ir specialiųjų statinių katedra, VGTU

VGTU leidyklos TECHNIKA 1410-S mokomosios
metodinės literatūros knyga

<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-457-357-6

eISBN 978-609-457-381-1

doi: 10.3846/1410-S

© Alfonsas Daniūnas, 2012

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2012

TURINYS

Įvadas	4
1. Bendras plonasienių konstrukcijų apibūdinimas.	5
2. Plonasienių elementų skaičiavimo teoriniai pagrindai.	9
3. Bendrosios plonasienių elementų skaičiavimo pagal EC3 nuostatos	16
4. Vietinis ir iškreipiamasis pastovumas	26
5. Skerspjūvių laikomoji galia	32
6. Klumpamoji galia	39
7. Tinkamumo ribiniai būviai	46
8. Jungčių projektavimas	47
9. Stogo ilginiai	49
10. Kolonos.	62
11. Sijos.	64
12. Trapeciniai lakštiniai profiliuočiai	65
13. Statiniai iš plonasienių konstrukcijų	67
14. Plonasienių konstrukcijų skaičiavimo pavyzdžiai	72
Priedas. Plonasienių elementų lenkimas ir sukimas	96
Literatūra	103

IVADAS

Projektuojant statinius siekiama, kad jie būtų lengvi ir ekonomiški, todėl vis plačiau naudojamos plonasienės konstrukcijos. Plonasieniai elementai, tokie kaip ilginiai, rėmo elementai (kolonos, sijos), vis dažniau pakeičia tradicinius valcuotus elementus (sijas, kolonas) ir ypač valcuotus ilginius. Taip pat šie plonasieniai elementai dažnai pakeičia ir konstrukcijas iš kitų medžiagų, pvz., medines. Prie plačiai naudojamų konstrukcinių elementų reikia priskirti ir profiliuotus lakštus. Jie jau buvo naudojami ir gerokai anksčiau. Tačiau dabar dėl tobulesnės jų gamybos technologijos (sudėtingesnė forma ir pan.) ir tinkamumo ne tik stogams, bet ir net perdangoms, jų naudojimo sritis labai išsiplėtė.

Skaičiuojant plonasienius elementus turi būti atsižvelgta į tai, kad, veikiant ašiniai jėgai, lenkimo momentui, skersinei jėgai ir jų bendram poveikiui, gali būti pasiekti šie ribiniai būviai: tamprus pastovumo ribinis būvis, kai plonasienis elementas netenka laikomosios galios dėl vietinio ar bendrojo pastovumo netekimo; tamprus ribinis būvis, kai labiausiai įtemptose skerspjuvio dalyse pasiekiami įtempiai lygūs didžiausiems įtempiams, kai laikoma, kad medžiaga dar dirba tampriai; plastinis ribinis būvis, kai skerspjuvyje pasiekiami įtempiai tarus, kad medžiaga dirba idealiai tampriai plastiškai; šiuo atveju neturi būti vertinamas medžiagos sustiprėjimas ir maksimalūs įtempiai imami didžiausi, kad dar medžiaga laikoma, kad dirba tampriai; suirimo ribinis būvis, kai pasiekama tikroji skerspjuvio laikomoji galia vertinant medžiagos sustiprėjimą.

Mokomojoje knygoje aptarti teoriniai plonasienių elementų skaičiavimo metodai ir praktiniai skaičiavimo metodai, paremti projektavimo eurokodais. Pateikta teorinė medžiaga iliustruota plonasienių konstrukcijų skaičiavimo pavyzdžiais. Priede pateikta sukamųjų plonasienių elementų skaičiavimo teorija.

1. BENDRAS PLONASIENIŲ KONSTRUKCIJŲ APIBŪDINIMAS

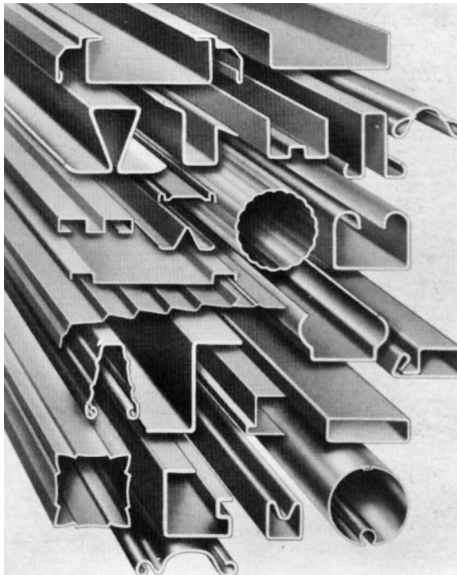
Plonasienėms metalinėms konstrukcijoms priskiriami:

- elementai iš šaltai suformuotų (*cold-formed*) skerspjūvių;
- sudėtinio skerspjūvio elementai iš liaunų plonų lakštų (sijos, kolonos);
- kevalai, plokštės.

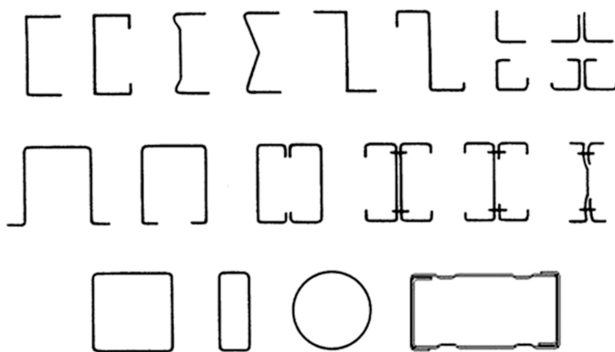
Dažniausiai plonasienės metalinės konstrukcijos suprantamos kaip konstrukcijos, sudarytos iš šaltai suformuotų elementų (1.1 pav.).

Šaltai formuoti (CF) gaminiai:

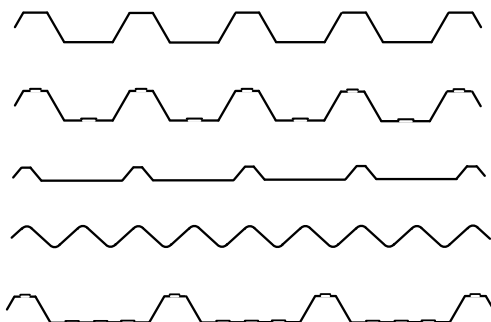
- elementai;
- trapeciniai lakštiniai profiliuočiai (kartais vadinami banguotaisiais lakštais);
- trisluoksnės (*sandwich*) plokštės (1.4 pav.).



1.1a pav. Šaltai formuoti skerspjūviai



1.1b pav. Šalta formuoti skerspjūviai



1.2 pav. Trapecinių lakštinių profiliuočių skerspjūviai

Trapeciniai lakštiniai profiliuočiai naudojami:

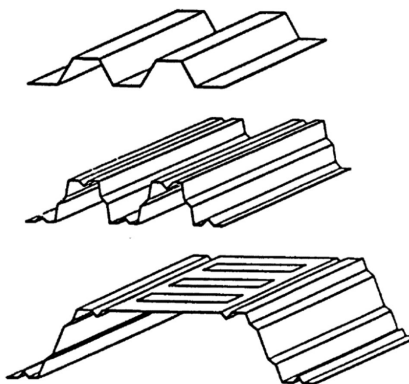
- stogo paklotui;
- perdangų paklotui;
- trisluoksnės plokštės.

Trapecinių lakštinių profiliuočių parametrai:

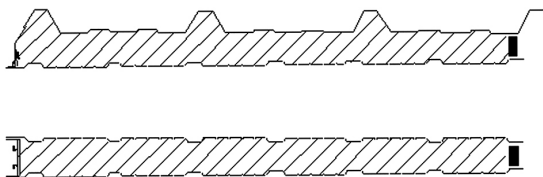
- aukštis – 40–200 mm;
- storis 0,5–2 mm;
- gali būti naudojami ir kiti matmenys.

Trapecinių lakštinių profiliuočių tipai (1.2, 1.3 pav.):

- be sąstandų (paprastai iki 3 m tarpatramiams);
- su išilginėmis sąstandomis (iki 7 m tarpatramiams);
- su išilginėmis ir skersinėmis sąstandomis (iki 12 m tarpatramiams).



1.3 pav. Trapecinių lakštinių profiliuotųjų tipai
(Projektas ESDEP Course 2008)



1.4 pav. Trisluksnių plokščių skerspjūviai

Šaltai formuotų (CF) gaminių gamybos būdai (1.5, 1.6 pav.):

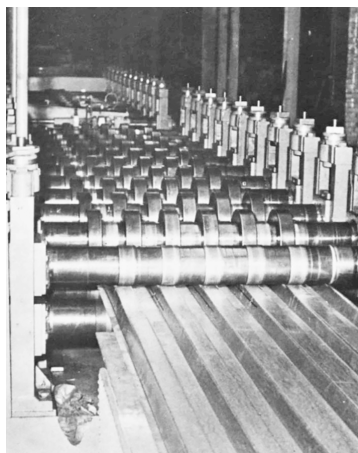
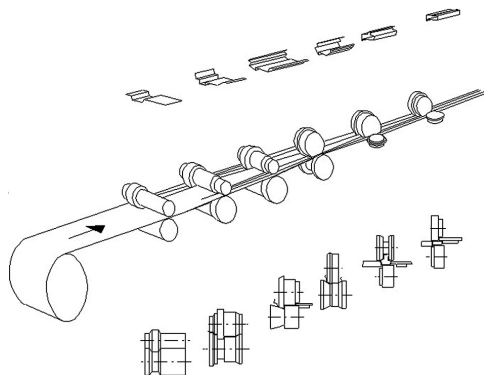
- šaltasis valcavimas;
- šaltasis lankstymas.

Šaltai formuotų (CF) gaminių medžiagos:

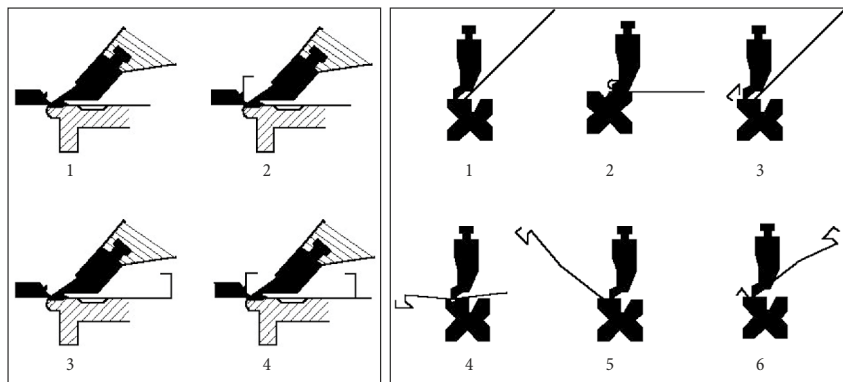
- plieno lakštai tinkami šaltajam formavimui, kurių
- takumo riba yra 200–550 MPa;
- antikorozinės dangos, dažniausiai cinko (tuomet lakšto storis paprastai neturi būti didesnis kaip 3,5 mm);
- aliuminio lydinų lakštai.

Šaltai formuotų (CF) gaminių privalumai:

- statybinis efektyvumas (didelis laikomosios galios ir svorio santykis);
- lengvumas sumažina bendrą konstrukcijos svorį;
- geras paviršiaus apdorojimas;
- projektavimo įvairovė (įvairūs skerspjūviai);
- didelis montavimo greitis;



1.5 pav. Šaltai formuotų gaminių valcavimas



1.6 pav. Šaltai formuotų gaminių lankstymas

- lengvai pritaikoma šilumos ir garso izoliacija;
- daugeliu atvejų gana paprasti sujungimai.

Šaltai formuoti (CF) gaminiai naudojami lengvosioms konstrukcijoms, iš kurių statomi:

- gamybiniai ir visuomeniniai pastatai;
- gyvenamieji pastatai;
- laikinieji pastatai;
- kompozitinės konstrukcijos.

2. PLONASIENIŲ ELEMENTŲ SKAIČIAVIMO TEORINIAI PAGRINDAI

Bendrosios pastabos

Skaičiuojant plonasienesius elementus turi būti atsižvelgta į tai, kad, veikiant ašiniai jėgai, lenkimo momentui, skersinei jėgai ir jų bendram poveikiui, gali būti pasiekti šie ribiniai būviai:

- tamprus pastovumo ribinis būvis, kai plonasienis elementas netenka laikomosios galios dėl vietinio ar bendrojo pastovumo netekimo;
- tamprus ribinis būvis, kai labiausiai įtemptose skerspjūvio dalyse pasiekiami įtempiai lygūs didžiausiems įtempiams, tarus, kad dar medžiaga dirba tamptariai;
- plastinis ribinis būvis, kai skerspjūvyje pasiekiami įtempiai, tarus, kad medžiaga dirba idealiai tamptariai plastiškai; šiuo atveju neturi būti vertinamas medžiagos sustiprėjimas ir maksimalūs įtempiai imami didžiausi, kad dar medžiaga laikoma, jog dirba tamptariai;
- suirimo ribinis būvis, kai pasiekama tikroji skerspjūvio laikomoji galia vertinant medžiagos sustiprėjimą.

Šiuos ribinius būvius galima apskaičiuoti taikant plonasienių elementų stiprumo ir stabilumo skaičiavimus.

Plonasienių elementų skaičiavimo ypatybės atsiranda todėl, kad lankstyto skerspjūvio elementai yra labai ploni. Šį plonumą nusako aukščio (pločio) ir storio santykis, todėl šie elementai gali netekti pastovumo dėl atskirų jo dalių vietinio pastovumo praradimo jau esant tamptariajam būviui. Plonasieniuose elementuose išpjautos skylės dar padidina vietinio pastovumo praradimo galimybę.

Tamprus plonasienio elemento netekimo formos gali būti vietinio pastovumo netekimas, iškreipiamojo pastovumo netekimas ir elemento bendrojo pastovumo netekimas. Šias netekimo formas galima apibūdinti taip:

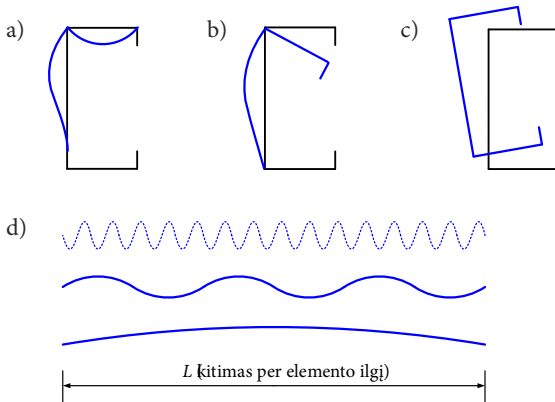
- Vietinis pastovumas: skerspjūvio elementų pastovumo netekimas, kai skerspjūvio elementų sujungimai išlieka tiesūs ir kampai tarp skerspjūvio elementų išlieka nepakitę.

- Iškreipiamasis pastovumas: atsiranda dėl skerspjūvio distorsijos ir yra susietas su skerspjūvio formos pasikeitimu, nevertinant vietinio pastovumo.
- Bendrasis pastovumas arba lenkiamasis-sukamasis stabilumas: elemento pastovumo forma, kuri apima elemento išlinkius iš lenkimo plokštumos kartu su skerspjūvio susisukimu apie skerspjūvio šlyties centrą.

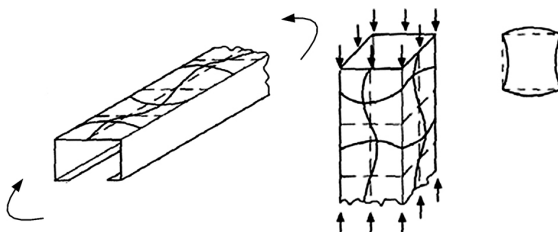
C skerspjūvio elemento skerspjūvio ir viso elemento pastovumo netekimo formas parodytos 2.1 pav.

Vietinis pastovumas

Elemento plokštelių vietinio pastovumo netekimo formas parodytos 2.2 pav.



2.1 pav. C skerspjūvio formos elemento galimos pastovumo netekimo formos: a – vietinis pastovumas, b – iškreipiamasis pastovumas, c – lenkiamasis- sukamasis pastovumas, d – vietinio, iškreipiamojo ir lenkiamojo-sukamojo pastovumo netekimo kitimas per elemento ilgį (vieną pusbangį)



2.2 pav. Elementų vietinis pastovumas: a – lenkiamasis elementas, b – gniuždomasis elementas

Plonų plokštelių pastovumas

Visus plieninius plonasienius elementus (jų skerspjūvius) galima laikyti sudarytus iš stačiakampių plokštelių (juostų, sienelės ir t. t.), kurios tarpusavyje yra sujungtos. Šios plokštelės jų plokštumoje gali būti tempiamos, gniuždomos, lenkiamos, veikiamos vietinės apkrovos arba veikiamos kelių minėtų poveikių vienu metu.

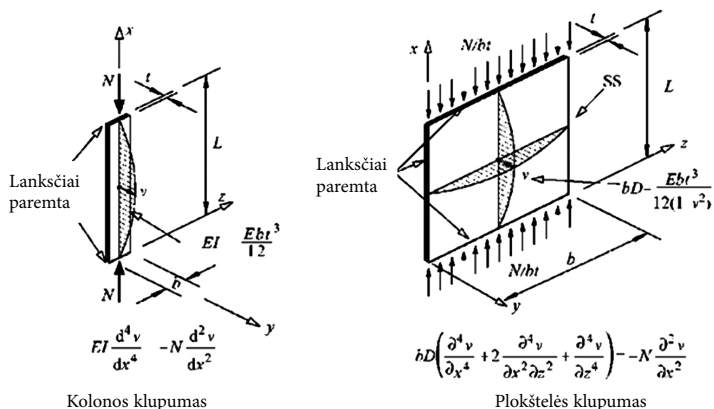
Plokštelių elgsena (2.3 pav.) aprašoma ketvirtosios eilės diferencialine lygtimi. Iš jos galima rasti plokštelės poslinkį. Žinant plokštelės poslinkius, galima rasti ir kritinius įtempius, prie kurių plokštelė netenka pastovumo. 2.4 pav. parodyta plokštelių galimos netekimo formos veikiant normaliniams ir tangentiniais įtempiams.

Plonasienių skerspjūvių vietinis pastovumas paprastai nustatomas skerspjūvį sudalijant į atskiras plokšteles.

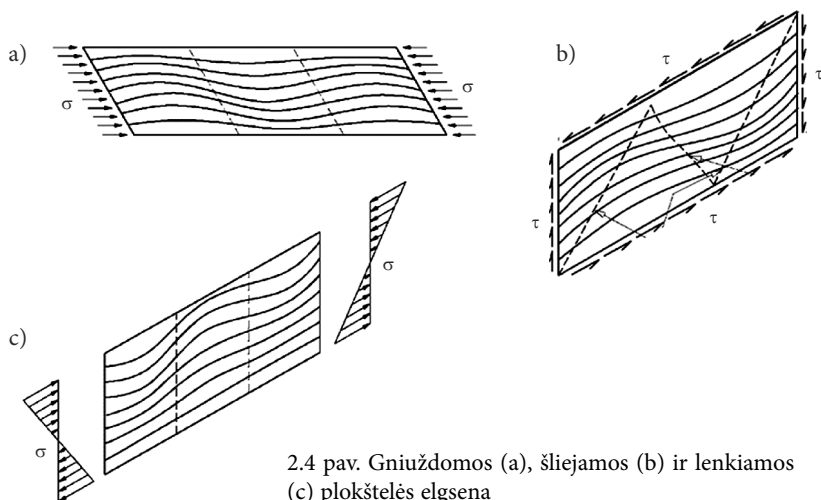
C formos skerspjūvio elemento, jei jis yra gniuždomas, sienelė yra sustandintas skerspjūvio elementas, kuris gali būti modeliuojamas kaip tolygiai gniuždoma ilga stačiakampė plokštelė laisvai paremtais kraštais. Tokios plokštelės kritiniai įtempiai skaičiuojami taip:

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2,$$

čia E – tamprumo modulis; ν – Puasono koeficientas; t – plokštelės storis; w – plokštelės plotis; k – plokštelės klumpumo koeficientas; šiuo atveju lygus 4,0.



2.3 pav. Gniuždomos kolonos ir gniuždomos plokštelės elgsenos ir skaičiavimų palyginimas



2.4 pav. Gniuždomos (a), šliejamos (b) ir lenkiamos (c) plokštelės elgsena

Juosta yra sustandintas skerspjuvio elementas, kurio vienas kraštas sustandintas skerspjuvio užlanka. Šio krašto parėmimo sąlygas įvertinti sunkiausia. Esant gana plačiai užlankai, galima juostą modeliuoti kaip laisvai kraštais paremtą plokštelę. Kai užlanka yra neaukšta, praktiškai turime kraštą, artimą laisvam kraštui, ir juostą tuomet reikėtų modeliuoti kaip plokštelę, kurios vienas kraštas laisvai paremtas, o kitas kraštas yra laisvas.

Užlanka yra nesustandintas elementas ir ją galima modeliuoti kaip plokštelę, kurios vienas kraštas laisvai paremtas, o kitas kraštas visiškai laisvas. Šiuo atveju $k = 0,425$.

Jei elementas yra netolygiai gniuždomas (pavyzdžiui, veikiamas lenkimo momento), tai plokštelių kritiniai įtempiai apskaičiuojami pagal tą pačią formulę, tik imant kitokį plokštelės klupumo koeficientą.

Skerspjuvio vietinio pastovumo tikrinimas, imant skerspjuvio elementus kaip atskiras plokšteles, neužtikrina viso skerspjuvio pusiausvyros ir suderinamumo. Kaip pavyzdį čia galima nurodyti, kad skaičiuojant atskiras plokšteles įtempiai plokštelių kraštuose, kur jos susiglaudžia (skerspjuvio briauna), būtų nevienodi.

Plokščių jungtys

Dauguma elementų yra sudaryti iš plokščių plokštelių (pvz., dvitėjas iš trijų plokštelių). Faktiškai šios plokštelės tarpusavyje per bendras kraštines sujungtos standžiai. Skaičiavimui supaprastinti tariama, kad visos plokštelės per bendras kraštines yra sujungtos lanksčiai (šarnyriškai), o ir nesusungtos kraštinės yra visiškai laisvos (t. y. poslinkiai nesuvaržyti). Tokiu būdu gaunamas konservatyvus sprendinys („į atsargos pusę“).

Pokritinė plokštelių elgsena

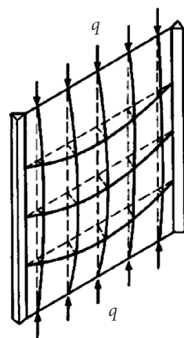
Plonasiene plokštelė, netekusi pastovumo, gali ir toliau perimti apkrovą. Taip yra todėl, kad plokštelė nėra visiškai laisva, ji įtvirtinta bent jau dviem kraštais (2.5 pav.).

Šiuo atveju didinant apkrovą, įtempiai prie plokštelės įtvirtinimų didėja, o link plokštelės vidurio mažėja. Šis efektas yra tuo didesnis, kuo didesnis plokštelės pločio ir storio santykis. Mažėjimas įtempių plokštelės vidurio link rodo, kad tos plokštelės dalies poslinkiai didėja ir ji negali jau perimti apkrovos. Įtempiai prie plokštelės kraštų didėja, kol pasiekiamas takumas (tekėjimas pasiekiamas dėl normalinių ar tangentinių įtempių ar jų bendro poveikio). Toliau net mažai padidinus apkrovą, įtempiai pradeda greitai didėti ir plokštelė suyra.

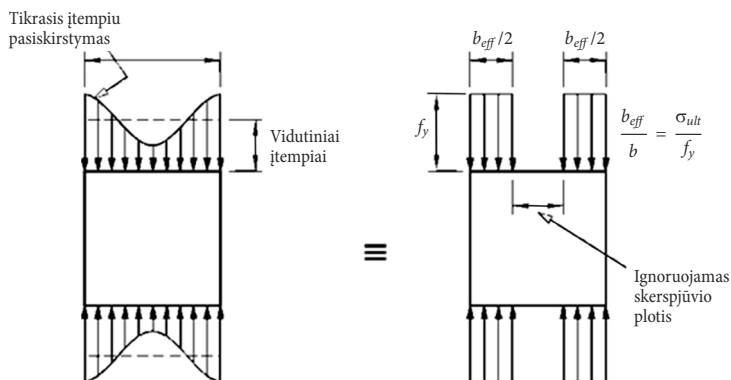
Analitiškai apskaičiuoti šį būvį yra sunku, todėl jis modeliuojamas apytiksliai taikant vadinamąją efektyvaus pločio koncepciją. Pagal ją plokštei esant ribinio būvio vidurinė jos dalis nevertinama (išmetama) ir tariama, kad kraštinėse dalyse įtempių pasiskirstymas yra tolygus ir įtempiai yra lygūs takumo įtempiams (2.6 pav.).

Pasiūlyta, kad efektyvus plotis nustatomas iš sąlygos:

$$\frac{b_{eff}}{b} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}}.$$



2.5 pav. Stačiakampės plokštelės pokritinė elgsena



2.6 pav. Efektyvaus pločio koncepcijos taikymas

Eksperimentai gerai patvirtina šią sąlygą, tačiau, įvertinant išankstinį plokštelių neplokštumą (kreivumą) ir liekamuosius įtempius, pasiūlyta, kad plonasieneis lankstytiems skerspjūviams:

$$\frac{b_{eff}}{b} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}} \left(1 - 0,22 \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}} \right).$$

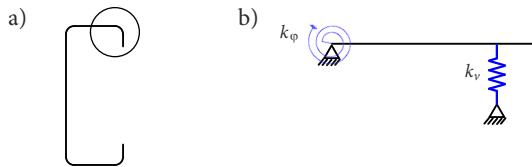
Atkreiptinas dėmesys, kad pokritinis skaičiavimas galimas tik taikant netiesinę plokštelių skaičiavimo teoriją.

Iškreipiamasis pastovumas

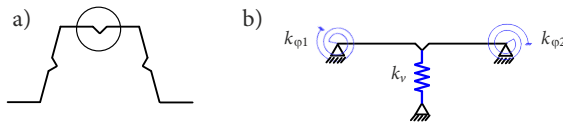
Kaip minėta, iškreipiamasis pastovumas dėl skerspjūvio distorsijos – tai skerspjūvio formos pasikeitimas nevertinant atskirų skerspjūvio elementų vietinio pastovumo. Nustatyti kritinius iškreipiamojo pastovumo netekimo įtempius analitiškai yra sunku.

Paprastai aptariami du distorsijų deformacijų vertinimo atvejai: kai turime kraštines sąstandas ir kai turime tarpines sąstandas.

Paprastai atliekant inžinerinius skaičiavimus iškreipiamasis klupumas vertinamas modeliuojant kraštinę sąstandą kaip gniuždomą strypą ant tampraus pagrindo, tai modeliuojama spyruokle, kurios standis priklauso nuo kraštinėje sąstandoje jungiamų plokščių skerspjūvio dalių lenkiamojo standžio ir elemento pakraštinių sąlygų (2.7 pav.). Iškreipiamasis pastovumas tarpinių sąstandų atveju vertinamas panašiai kaip ir kraštinių sąstandų atveju (2.8 pav.).



2.7 pav. Kraštinės sąstandos iškreipiamojo pastovumo vertinimo modelis:
a – visas skerspjūvis; b – kraštinės sąstandos skaičiavimo modelis



2.8 pav. Tarpinės sąstandos iškreipiamojo pastovumo vertinimo modelis:
a – visas skerspjūvis; b – kraštinės sąstandos skaičiavimo modelis

Aptarta iškreipiamojo pastovumo modeliavimo metodika pritaikyta euro-kode.

Bendrasis lenkiamasis-sukamasis pastovumas

Ekscentriškai gniuždomi strypai gali klupti išlinkdami apie vieną iš svarbiausių skerspjūvio ašių dėl lenkiamojo klupumo netekimo, gali susisukti apie šlyties centrą dėl sukamojo klupumo netekimo arba išlinkti ir susisukti nuo dėl lenkiamojo-sukamojo klupumo netekimo (2.1 pav.).

Priklausomai nuo skerspjūvio formos, apkrovos pobūdžio ir strypo įtvirtinimo sąlygų gali pasireikšti viena ar kita klupumo netekimo forma. Plonasieniuose elementuose dėl skerspjūvio nesimetriškumo atviros skerspjūvio formos dažniausiai pasireiškia lenkiamasis-sukamasis klupumo netekimo atvejis.

3. BENDROSIOS PLONASIENIŲ ELEMENTŲ SKAIČIAVIMO PAGAL EC3 NUOSTATOS

Žymėjimai ir elementų ašys

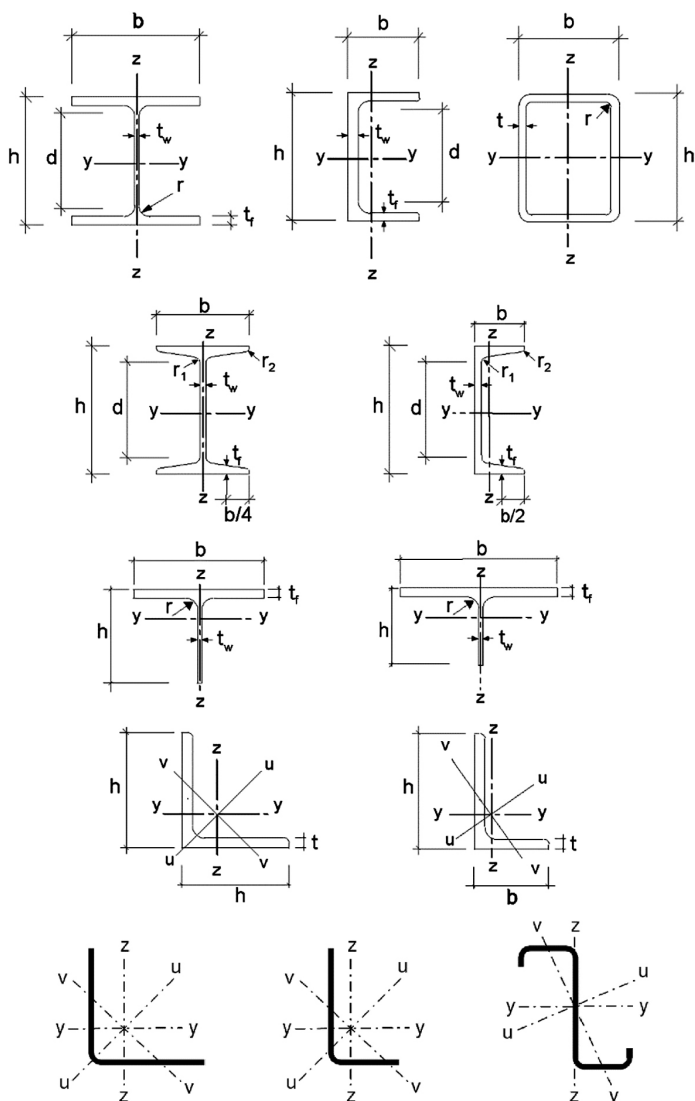
EC3 elementų ir jų skerspjuvių ašių žymėjimas yra suderintas su elementų ašių žymėjimu, taikomu kompiuterinėse skaičiavimo ir projektavimo programose. EC3 priimta, kad $x-x$ ašis eina per elemento sunkio centrą, o ašys $y-y$ ir $z-z$ yra skerspjuvio ašys. Dažniausiai $y-y$ ašis yra stiprioji svarbiausioji skerspjuvio ašis (lygiagrečiai su skerspjuvio juostomis), o $z-z$ ašis – silpnoji svarbiausioji ašis (3.1 pav.).

Skerspjuvių klasifikacija

Konstrukcijos elementų elgseną ir skaičiavimo metodus pirmiausia lemia elementų skerspjuvių elgsena. Vieniems skerspjuviams dėl jų dalių (sienelės, juostos ar pan.) standumo gali būti leidžiamos plastinės deformacijos, kitų skerspjuvių dalys yra gana liaunos ir gali netekti vietinio pastovumo jau tamprios būklės. Siekiant apibūdinti skerspjuvių elgseną, esant įvairiam įtempių būviui, visi skerspjuviai Eurokode 3 grupuojami į keturias skerspjuvių klases. Skerspjuvio priklausomybę vienai ar kitai skerspjuvio klasei lemia plieno stipris pagal takumo ribą ir skerspjuvio dalių pločio ir storio santykis.

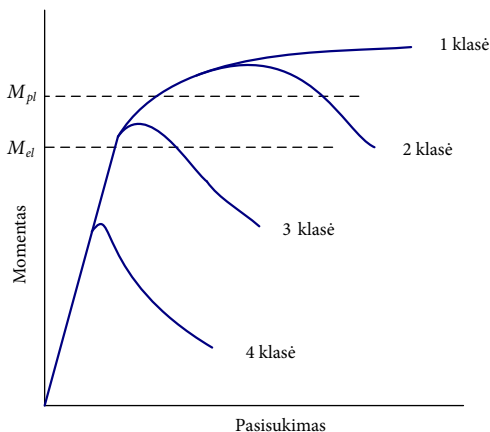
Skerspjuvių klasės (3.2 pav.) apibūdinamos taip:

- pirmos klasės skerspjuviai – tai skerspjuviai, kurie gali sudaryti analizei pagal plastiškąjį modelį reikiamą sukamosios gebos plastinę lankstą, kai bendroji galia nesumažėja. Gali būti pasiektas viso pirmos klasės skerspjuvio tekėjimas gniuždymo, lenkimo ir lenkimo gniuždymo atvejais ir gali būti naudojami projektuojant plastines konstrukcijas. Gniuždomomis dalimis laikomos visos dalys, kurios, veikiant nagrinėjamo derinio apkrovoms, yra visiškai arba iš dalies gniuždomos;
- antros klasės skerspjuviai – tai skerspjuviai, kurie pasiekia savo plastinę lenkiamąją galią, tačiau dėl vietinio klupumo jų sukamoji geba yra ribota. Kaip ir pirmos klasės skerspjuvių, gali būti viso antros klasės skerspjuvių tekėjimas, tačiau, palyginti su pirmos klasės skerspjuviais, antros klasės skerspjuviai turi mažesnę sukamąją gebą;



3.1 pav. Skerspjūvių matmenys ir ašys pagal EC3

- trečios klasės skerspjuviai – tai skerspjuviai, kuriuose įtempiai plieninio elemento kraštiniame gniuždomajame sluoksnyje, kai daroma tampriojo įtempių pasiskirstymo prielaida, gali pasiekti stiprį pagal takumo ribą, tačiau vietinis klupumas neleidžia pasiekti plastinės lenkiamosios galios. Trečios klasės skerspjuviuose dėl skerspjuvio dalių vietinio pastovumo leidžiamos tik tampriosios deformacijos, tad skerspjuvio laikomoji galia apskaičiuojama esant tampriai stadijai;
- ketvirtos klasės skerspjuviai – tai skerspjuviai, kuriuose vietinis klupumas įvyksta prieš pasiekiant stiprį pagal takumo ribą vienoje ar daugiau skerspjuvio dalių. Ketvirtos klasės skerspjuvių atskirose dalyse leidžiamas vietinio pastovumo netekimas tamprios stadijos ir tai turi būti vertinamas apskaičiuojant šių skerspjuvių laikomąją galią.



3.2 pav. Skerspjuvių elgsena ir klasės

Pirma, antra ir trečia skerspjuvio klasės nustatomos remiantis lentele, pateikta 3.3 pav. Skerspjuviai, kurių skerspjuvio dalys nepatenka ir į trečią klasę priskiriamas skerspjuvio dalis, laikomi ketvirtos klasės skerspjuviais. Atskirose jų dalyse leidžiamas vietinio pastovumo netekimas esant tampriajai stadijai.

Nustatant skerspjuvio klasę plieno stiprio dydžio įtaka įvertinama dauginant skerspjuvio dalies ribinį pločio ir storio santykį iš dydžio ε , kuris apskaičiuojamas taip:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}},$$

čia f_y – stipris pagal takumo ribą, jo dimensija MPa.

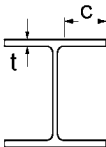
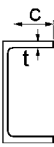
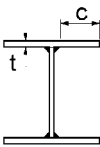
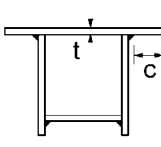
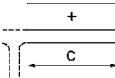
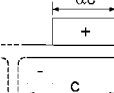
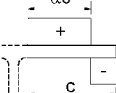
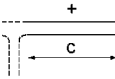
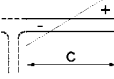
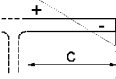
5.2 lentelė (1 lapas iš 3). Didžiausiosios gniuždomų dalių pločio ir storio santykio reikšmės

Vidinės gniuždomos dalys							
				Lenkimo ašis		Lenkimo ašis	
Klasė	Lenkimo veikiamas dalis	Gniuždymo veikiamas dalis		Lenkimo ir gniuždymo veikiamas dalis			
Įtempių pasiskirstymas dalyse (gniuždymas – teigiamas)							
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$		kai $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ kai $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$		kai $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ kai $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
Įtempių pasiskirstymas dalyse (gniuždymas – teigiamas)							
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$		kai $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ kai $\psi \leq -1^{*})$: $c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460	
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71	

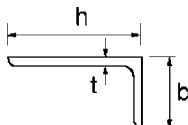
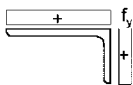
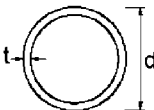
*) $\psi \leq -1$ galioja, kai gniuždomieji įtempių $\sigma \leq f_y$ arba tempiamoji deformacija $\varepsilon_y > f_y/E$.

3.3 pav. Tęsinys kitame puslapyje

5.2 lentelė (2 lapas iš 3). Didžiausiosios gniūždomų dalių pločio ir storio santykio reikšmės

Išsikišusios juostos							
							
Valcuotieji profiliuočiai				Virintiniai profiliuočiai			
Klasė	Gniūždymo veikiamas dalis	Lenkimo ir gniūždymo veikiamas dalis					
		Gniūždymo veikiamas galas		Tempimo veikiamas galas			
Įtempių pasiskirstymas dalyse (gniūždymas – teigiamas)							
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Įtempių pasiskirstymas dalyse (gniūždymas – teigiamas)							
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ k_σ žr. EN 1993-1-5					
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460	
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71	

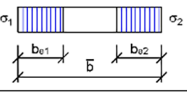
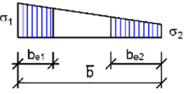
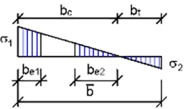
3.3 pav. Tęsinys kitame puslapyje

		Kampuočiai				
Taip pat taikoma „išsikišusioms juostoms“ (žr. 2 lapą)				Netaikoma kampuočiams, turintiems ištisinę sąlytį su kitais komponentais		
Klasė	Gniuždymo veikiamas skerspjuvis					
Įtempių pasiskirstymas dalyse (gniuždymas – teigiamas)						
3	$\eta / \epsilon \leq 15\epsilon : \frac{\beta + \eta}{2\epsilon} \leq 11,5\epsilon$					
Vamzdiniai profiluočiai						
						
Klasė	Lenkimo ir (arba) gniuždymo veikiamas skerspjuvis					
1	$\delta / \epsilon \leq 50\epsilon^2$					
2	$\delta / \epsilon \leq 70\epsilon^2$					
3	$\delta / \epsilon \leq 90\epsilon^2$					
	PASTABA	Santykių $\delta / \epsilon > 90\epsilon^2$ žr. EN 1993-1-6.				
$\epsilon = \sqrt{235 / \sigma_y}$	σ_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ϵ^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

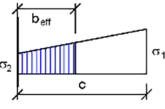
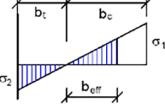
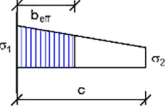
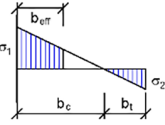
3.3 pav. 5.2 lentelė iš LST EN 1993-1-1

Ketvirtosios klasės skerspjuvių efektyvusis plotis, remiantis pirmiau pateiktais teoriniais pagrindais, praktiškai naudoti pateiktas 3.4 pav.

4.1 lentelė. Vidiniai gniuždomieji elementai

Įtempių pasiskirstymas (teigiami įtempiai, kai vyksta gniuždymas)				Efektyvusis ^p plotis b_{eff}		
				$\psi = 1$; $b_{eff} = \rho \bar{b}$; $b_{e1} = 0,5b_{eff}$; $b_{e2} = 0,5b_{eff}$.		
				$1 > \psi \geq 0$; $b_{eff} = \rho \bar{b}$; $b_{e1} = \frac{2}{5-\psi} b_{eff}$; $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$.		
				$\psi < 0$; $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$; $b_{e1} = 0,4b_{eff}$; $b_{e2} = 0,6b_{eff}$.		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Klumpo koeficientas k_c	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98(1 - \psi)^2$

4.2 lentelė. Išoriniai gniuždomieji elementai

Įtempių pasiskirstymas (teigiami įtempiai, kai vyksta gniuždymas)				Efektyvusis ^p plotis b_{eff}		
				$1 > \psi \geq 0$; $b_{eff} = \rho c$.		
				$\psi < 0$; $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$.		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$		
Klumpo koeficientas k_c	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$		
				$1 > \psi \geq 0$; $b_{eff} = \rho c$.		
				$\psi < 0$; $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$.		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	
Klumpo koeficientas k_c	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8	

3.4 pav. 4.2 lentelė iš LST EN 1993-1-5

Medžiagos

EC3 pateikiamos vardinės naudojamų plienų reikšmės turi būti naudojamos kaip charakteristinės reikšmės.

3.1a lentelė. Vardinės pradinio stiprio pagal takumo ribą f_{yb} ir ribinio tempiamojo stiprio f_u reikšmės

Plieno tipas	Standartas	Klasė	f_{yb} , N/mm ²	f_u , N/mm ²
Karštai valcuoti konstrukcinio plieno gaminiai. 2 dalis. Nelegiruotojo konstrukcinio plieno techninės tiekimo sąlygos	EN 10025 2 dalis	S 235	235	360
		S 275	275	430
		S 355	355	510
Karštai valcuoti konstrukcinio plieno gaminiai. 3 dalis. Normalizuoto/apdirbto normalizaciniu valcavimu suvirinamojo smulkiagrūdžio konstrukcinio plieno techninės tiekimo sąlygos	EN 10025 3 dalis	S 275 N	275	370
		S 355 N	355	470
		S 420 N	420	520
		S 460 N	460	550
		S 275 NL	275	370

3.5 pav. 3.1a lentelė iš [LST EN 1993-1-3]: f_{yb} – pradinis stipris pagal takumo ribą; f_u – stipris pagal takumo ribą

Šaltai lankstytuose profiliuose dėl šaltojo lenkimo gali padidėti stipris pagal takumą, todėl skaičiuojant naudojamas vadinamasis vidutinis stipris pagal takumo ribą:

$$f_{ya} = f_{yb} + (f_u - f_{yb}) \frac{knt^2}{A_g}, \text{ bet } f_{ya} \leq \frac{(f_u + f_{yb})}{2},$$

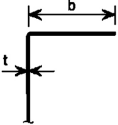
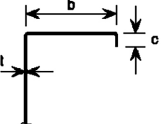
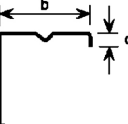
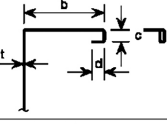
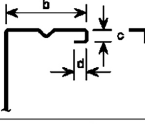
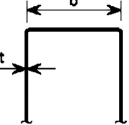
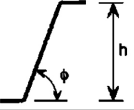
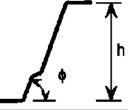
čia A_g – bendrasis skerspjūvio plotas; k – skaitinis koeficientas, priklausantis nuo formavimo būdo (pateikiamas LST EN 1993-1-3); n – skerspjūvio stačiųjų alkūnių, kurių spindulys $r \leq 5t$, skaičius; t – elemento storis prieš šaltąjį formavimą.

Vidutinio stiprio pagal takumo ribą naudojimo sritys nurodytos LST EN 1993-1-3 3.2.2 p.

Taikymo sritys

LST EN 1993-1-3 normų dalis gali būti taikoma elementams skaičiuoti, kai galioja pločio ir storio santykis, parodytas 3.6 pav.

5.1 lentelė. Didžiausieji pločio ir storio santykiai

Skerspjuvio elementas		Didžiausioji reikšmė
		$b/t \leq 50$
		$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$
		$b/t \leq 90$ $c/t \leq 60$ $d/t \leq 50$
		$b/t \leq 500$
		$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ $h/t \leq 500 \sin \phi$

3.6 pav. 5.1 lentelė iš LST EN 1993-1-3

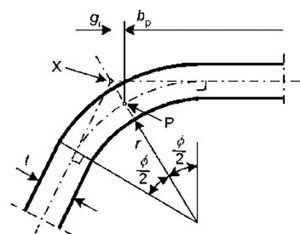
Skerspjuvių suapvalintų kampų poveikis

Šaltai formuojant skerspjuvius, neįmanoma gauti, kad skerspjuvio alkūnės nebūtų suapvalintos.

Skaičiuojant imama vartoti plokščiojo pločio sąvoka. Tai atstumas nuo vidurinės linijos kampinių taškų (3.7 pav.).

Skerspjuvio rodikliai (charakteristikos) gali būti skaičiuojamos taip:

- tiksliai pagal skerspjuvio geometriją (nėra supaprastinamų);
- galima nekreipti į suapvalinimo kampus dėmesio (imame skerspjuvį su „aštriomis alkūnėmis“), jei vidinis suapvalinimo spindulys $r \leq 5t$ ir $r \leq 0,10b_p$ (3.8 pav.);
- taikyti supaprastintą metodiką, pateikiamą duodamą LST EN 1993-1-3.



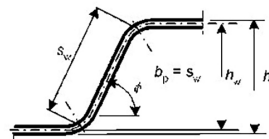
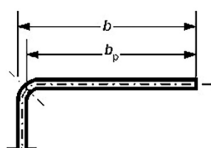
(a) Kampo arba alkūnės vidurinis taškas

X – vidurinių tiesių sankirta;

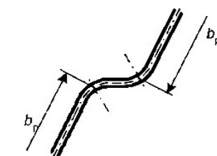
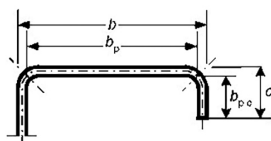
P – kampo vidurinis taškas.

$$r_m = r + t / 2 ;$$

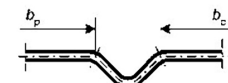
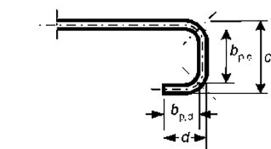
$$g' = r_m \left(\eta' \left(\frac{\phi}{2} \right) - \sin \left(\frac{\phi}{2} \right) \right) .$$



(c) Tariamasis sienelės plokščiasis plotis b_p (b_p – nuožulnumo aukštis s_w)



(d) Tariamasis plokščiųjų dalių, esančių greta sienelės sąstamos, plokščiasis plotis b_p

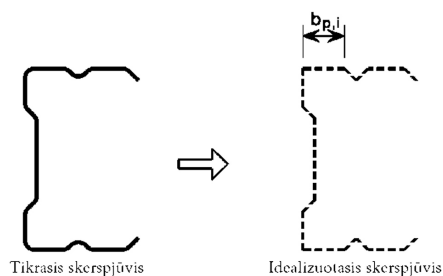


(e) Tariamasis plokščiųjų dalių, esančių greta tuostos sąstamos, plokščiasis plotis b_p

(b) Tariamasis plokščiųjų juostų dalių plokščiasis plotis b_p

5.1 paveikslas. Tariamieji plokščiųjų skerspjūvio dalių pločiai b_p , priklausantys nuo kampo spindulio

3.7 pav. 5.1 pav. iš LST EN 1993-1-3



3.8 pav. 5.2 pav. iš LST EN 1993-1-3

4. VIETINIS IR IŠKREIPIAMASIS PASTOVUMAS

Bendrosios pastabos

Teorinėje dalyje nagrinėdami gniuždomų plokštelių pastovumą teigėme, kad esant pokritiniam būviui netolygų įtempių pasiskirstymą galima pakeisti tolygiu įtempių pasiskirstymu tarus, kad jų dydis lygus plastinio tekėjimo įtempiams, ir sumažinant elemento plotį (elemento storis paliekamas toks pat). Kiekvieno skerspjuvio gniuždomojo elemento efektyvusis plotis apskaičiuojamas iš plokštelės pastovumo. Jei turi sąstandas, tuomet efektyvusis plotis skaičiuojamas tarp sąstandų ar sąstandos ir kampo. Taria, kad alkūnės ir sąstandos turi tam tikrą standumą ir skaičiuojant modeliuojami kaip ištisinės per visą ilgį turinčios tam tikrą standį atramos ir jos paprastai modeliuojamos kaip spyruoklės. Jų standis priklauso nuo prijungiamų elementų lenkiamojo standžio.

Plokštieji elementai be sąstandų

Efektyvusis plotis (3.4 pav.) apskaičiuojamas taip:

$$b_{eff} = \rho b_p,$$

čia ρ – lakšto klupumo koeficientas (skerspjuvio elemento pločio redukavimo koeficientas). Šis koeficientas, kai yra vidiniai gniuždomieji elementai, apskaičiuojamas taip:

$$\rho = 1,0, \quad \text{kai } \bar{\lambda}_p \leq 0,673,$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p}, \quad \text{kai } \bar{\lambda}_p > 0,673,$$

čia $(3 + \psi) \geq 0$;

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}},$$

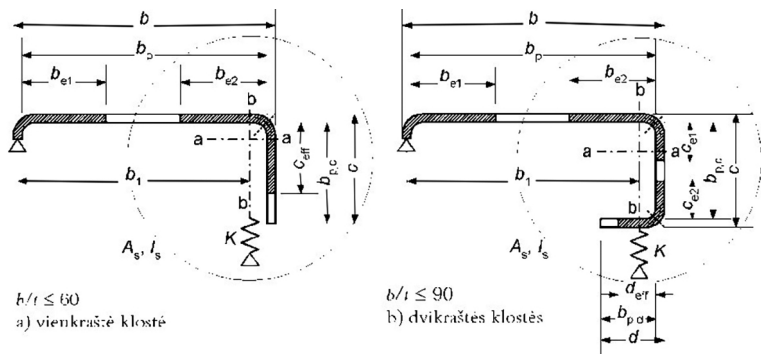
čia ψ – įtempių koeficientas; k_σ – klupumo koeficientas.

Šie dydžiai pateikti LST EN 1993-1-5 4.4 p.

Plokštieji elementai su kraštinėmis sąstandomis

Elementų su kraštinėmis sąstandomis (4.1 pav.) skaičiavimas susdeda iš kelių procedūrų.

Pirmiausia nustatome efektyviuosius plotus (pločius) atskirai kiekvienai skerspjuvio daliai, t. y. skerspjuvio daliai tarp alkūnės ir tarpinės sąstandos ar dviejų tarpinių sąstandų ar pan. (3.4 pav.). Apskaičiuojamos sąstandų efektyviojo skerspjuvio charakteristikos.



5.7 paveikslas. Kraštinės sąstandos

4.1 pav. 5.7 pav. iš LST EN 1993-1-3

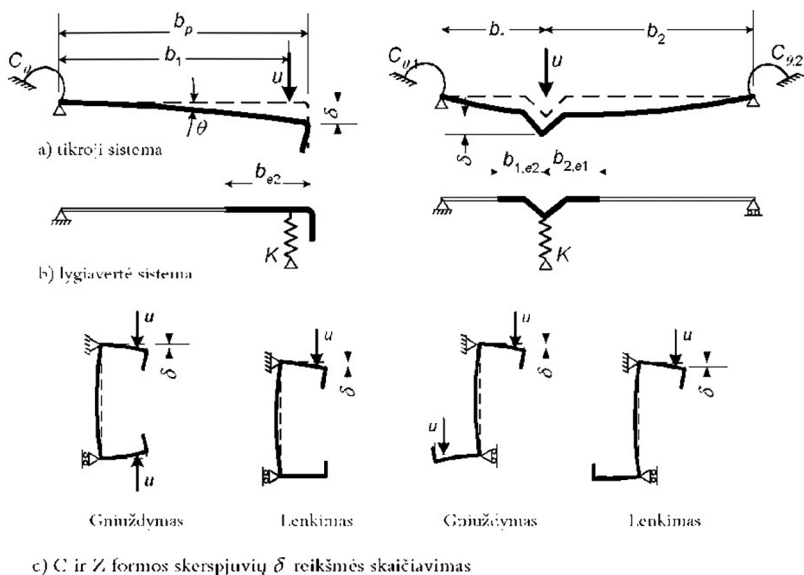
Antru žingsniu, remiantis pradinio efektyviuoju sąstandos skerspjūvio plotu, nustatyti iškreipiamojo klupumo (sąstandos lenkiamojo klupumo) koeficientą, atsižvelgiant į ištisinio spyruoklinio įtvirčio poveikius (LST EN 1993-1-3 5.5.3.2 p).

Gniuždomųjų elementų su kraštinėmis arba tarpinėmis sąstandomis projektavimas turi būti pagrįstas prielaida, kad sąstandos elgsena yra kaip gniuždomojo elemento, turinčio ištisinį dalinį įtvirtį ir spyruoklinį standį, kuris priklauso nuo kraštinių sąlygų ir gretimų plokščiųjų elementų lenkiamojo standžio.

Spyruoklinis sąstandos standis (4.2 pav.) turi būti nustatytas taikant vienetinį ilgį veikiančią vienetinę apkrovą u . Vienetinio ilgio spyruoklinis standis K nustatomas taip:

$$K = u/\delta,$$

čia u – vienetinė apkrova per visą sąstandos ilgį; δ – sąstandos ilkinis, sukeltas vienetinės apkrovos u .



5.6 paveikslas. Spyruoklinio standžio nustatymas

4.2 pav. 5.6 pav. iš LST EN 1993-1-3

Iškreipiamojo klupumo (lenkiamojo sąstandos klupumo) koeficientas apskaičiuojamas taip:

$$\chi_d = 1,0, \text{ kai } \bar{\lambda}_d \leq 0,65,$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d, \text{ kai } 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38,$$

$$\chi_d = 0,66 / \bar{\lambda}_d, \text{ kai } \bar{\lambda}_d \geq 1,38,$$

$$\text{čia } \bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb} / \sigma_{cr,s}} \cdot \pi.$$

Tamprieji kritiniai kraštinės sąstandos įtempiai apskaičiuojami taip:

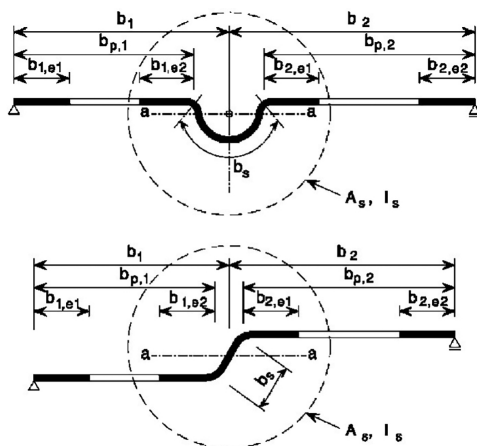
$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{K E I_s}}{A_s},$$

čia K – spyruoklinis standis; I_s – efektyvusis sąstandos skerspjūvio ploto inercijos momentas.

Trečiu žingsniu papildomomis iteracijomis patikslinama sąstandos klupumo koeficiento reikšmė ir efektyvusis sąstandos storis.

Plokštieji elementai su tarpinėmis sąstandomis

Plokščiųjų elementų su tarpinėmis sąstandomis (4.3 pav.) skaičiavimą sudaro trys žingsniai. Jų paskirtis tokia pat kaip ir prieš tai nagrinėtu atveju, kai plokštieji elementai yra su kraštinėmis sąstandomis. Skaičiavimą žr. LST EN 1993-1-3 5.5.3.3 p.



5.9 paveikslas. Tarpinės sąstandos

4.3 pav. 5.9 pav. iš LST EN 1993-1-3

Trapeciniai lakštiniai profiliuočiai su tarpinėmis sąstandomis

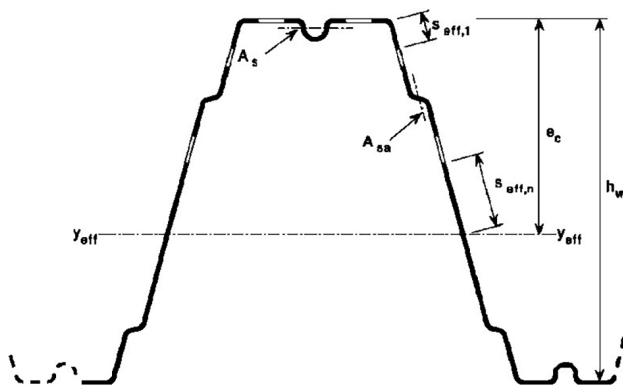
Juostos su tarpinėmis sąstandomis

Efektyvusis juostos tarpinės sąstandos plotas apskaičiuojamas pagal 4.4 pav. Šiame paveiksle pateikti duomenys naudojami ir sąstandos inercijos momentui skaičiuoti.

Skaičiavimą žr. LST EN 1993-1-3 5.5.3.4.2 p.

Profiliuočiai su juostų ir sienelių sąstandomis

Kai lakštiniai profiliuočiai yra su tarpinėmis juostų ir sienelių sąstandomis (4.6 pav.), į iškreipiamąjo klupumo (juostos ir sienelės sąstandų lenkiamąjo klupumo) sąveiką turi būti atsižvelgiama abiejų tipų sąstandams taikant patikslintąją tampriųjų kritinių įtempių $\sigma_{cr,mod}$ reikšmę.



5.14 paveikslas. Trapecinis lakštinis profiliuotis su juostų ir sienelių sąstandomis

4.6 pav. 5.14 pav. iš LST EN 1993-1-3

5. SKERSPJŪVIŲ LAIKOMOJI GALIA

Bendrosios pastabos

Skaičiuojant skerspjūvių laikomąją galią turi būti atsižvelgta į vietinio klumpumo poveikį taikant efektyviojo skerspjūvio rodiklius (žr. vietinį pastovumą) ir elementų klumpamąją galią. Skerspjūvio laikomosios galios skaičiavimo metodika pateikta pagal LST EN 1993-1-3.

Ašinis tempimas

Tolygiai tempiamo elemento galia nustatoma taip:

$$N_{t,Rd} = \frac{f_{ya} A_g}{\gamma_{M0}}, \text{ bet } N_{t,Rd} \leq F_{n,Rd},$$

čia A_g – bendrasis skerspjūvio plotas; $F_{n,Rd}$ – grynojo skerspjūvio laikomoji galia pagal atitinkamą mechaninės jungės tipą (varžtai, kniedės, suvirinimas ir t. t.; žr. atitinkamus skyrius); f_{ya} – vidutinis stipris pagal takumo ribą; $\gamma_{M0} = 1,0$ – pastatams.

Ašinis gniuždymas

Tolygiai gniuždomo elemento galia nustatoma taip:

- a) jei efektyvusis skerspjūvio plotas yra mažesnis už bendrąjį skerspjūvio plotą ($A_{eff} < A_g$):

$$N_{c,Rd} = A_{eff} f_{yb} / \gamma_{M0};$$

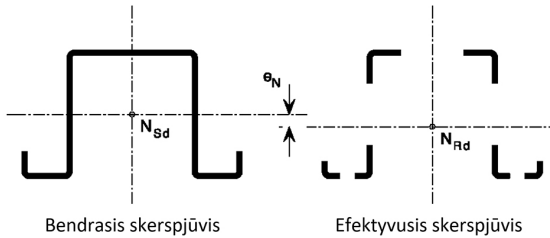
- b) jei efektyvusis skerspjūvio plotas A_{eff} yra lygus bendrajam skerspjūvio plotui ($A_{eff} = A_g$):

$$N_{c,Rd} = A_g \left(f_{yb} + (f_{ya} - f_{yb}) 4 \left(1 - \frac{\bar{\lambda}_{e,max}}{\bar{\lambda}_{e0}} \right) \right) / \gamma_{M0}, \text{ bet } N_{c,Rd} \leq \frac{f_{ya} A_g}{\gamma_{M0}},$$

čia A_{eff} – efektyvusis skerspjūvio plotas, tarus, kad gniuždomieji įtempiai pasiskirsto tolygiai per skerspjūvį; f_{ya} – vidutinis stipris pagal takumo ribą;

f_{yb} – pradinis stipris pagal takumo ribą; $\bar{\lambda}_{e,max}$, $\bar{\lambda}_{e0}$ – sąlyginis elemento liaunis (žr. LST EN 1993-1-3 5.5 sk.).

Jei efektyviojo skerspjūvio ploto sunkio centras nesutampa su bendrojo skerspjūvio sunkio centru turi būti atsižvelgiama į sunkio centro ašių poslinkį e_N (žr. 5.1 pav.), kurio taikymas pateiktas prie klumpamosios galios skaičiavimų.



5.1 pav. Gniuždomasis efektyvusis skerspjūvis (pagal LST EN 1993-1-3)

Lenkiamasis momentas

Tamprioji ir tamprioji plastiškoji laikomoji galia, kai pasireiškia gniuždomosios juostos takumas

Lenkiamojo elemento laikomoji galia, kai momentas veikia tik apie vieną svarbiausių skerspjūvio ašių ir elementas nepatiria sukimo arba sukamosios, sukamosios lenkiamosios arba skersinės sukamosios, arba iškreipos klypties, nustatoma taip (žr. 5.2 pav.):

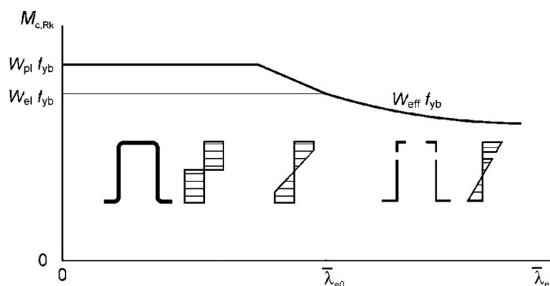
- a) jei efektyvusis skerspjūvio atsparumo momentas yra mažesnis už bendrąjį tamprųjų skerspjūvio atsparumo momentą ($W_{eff} < W_{el}$):

$$M_{c,Rd} = W_{eff} f_{yb} / \gamma_{M0};$$

- b) jei efektyvusis skerspjūvio atsparumo momentas yra lygus bendrajam tamprajam skerspjūvio atsparumo momentui ($W_{eff} = W_{el}$):

$$M_{c,Rd} = f_{yb} \left(W_{el} + (W_{pl} - W_{el}) 4 \left(1 - \frac{\bar{\lambda}_{e,max}}{\bar{\lambda}_{e0}} \right) \right) / \gamma_{M0}, \text{ bet } M_{c,Rd} \leq \frac{W_{pl} f_{yb}}{\gamma_{M0}},$$

čia W_{eff} – efektyvusis skerspjūvio atsparumo momentas efektyvųjų skerspjūvio plotą; W_{el} – bendrasis tamprusis skerspjūvio atsparumo momentas; W_{pl} – bendrasis plastinis skerspjūvio atsparumo momentas; f_{yb} – pradinis stipris pagal takumo ribą; $\bar{\lambda}_{e,max}$, $\bar{\lambda}_{e0}$ – sąlyginis elemento liaunis (žr. LST EN 1993-1-3 5.5 sk.).



5.2 pav. Lenkiamosios galios ir liaunio sąryšis (pagal LST EN 1993-1-3)

Dviašio lenkimo atveju stiprumo kriterijus užrašomas taip:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd}} \leq 1,$$

čia $M_{y,Ed}$ – lenkimo momentas apie svarbiausią skerspjūvio ašį; $M_{z,Ed}$ – lenkimo momentas apie silpniausią skerspjūvio ašį; $M_{cy,Rd}$ – skerspjūvio, lenkiamo tik apie svarbiausią y – y ašį, lenkiamoji galia; $M_{cz,Rd}$ – skerspjūvio, lenkiamo tik apie svarbiausią z – z ašį, lenkiamoji galia.

Tamprioji ir tamprioji plastiškoji laikomoji galia, kai takumas pasireiškia tik tempiamojoje juostoje

Lenkiant tik apie vieną svarbiausią ašį ir kai takumas pasireiškia pirmiausia tempiamajame krašte, plastinė tempiamos srities laikomoji galia gali būti išnaudota visai neribojant plastinių deformacijų, kol gniuždomieji įtempiai pasiekia f_{yb} / γ_{M0} . Šiuo atveju efektyvusis iš dalies plastiškas atsparumo momentas $W_{pp,eff}$ turi būti skaičiuojamas remiantis įtempių pasiskirstymu, kuris tempiamosios srities yra dvitiesis, o gniuždomosios – tiesinis.

Atsiknojimo dėl šlyties poveikis

Atsiknojimo dėl šlyties (*shear lag*) efekto skaičiavimas pateiktas LST EN 1993-1-3 3 sk.

Skersinė jėga

Skaičiuotinė šlyjamoji galia apskaičiuojama taip:

$$V_{b,Rd} = \frac{\frac{h_w}{\sin \phi} t f_{bv}}{\gamma_{M0}},$$

čia f_{bv} – šlyjamoji galia, atsižvelgiant į klupumą pagal LST EN 1993-1-3 6.1 lentelę; h_w – sienelės aukštis tarp juostų vidurinių linijų, žr. 5.3 pav.; ϕ – sienelės nuolydis juostų atžvilgiu, žr. 5.3 pav.

Sąlyginis sienelės liaunis apskaičiuojamas taip:

– sienelių be išilginių sąstandų:

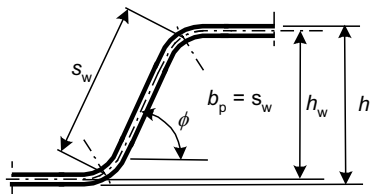
$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_w}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}};$$

– sienelių su išilginėmis sąstandomis:

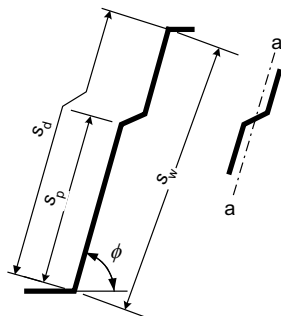
$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_d}{t} \sqrt{\frac{5,34 f_{yb}}{k_{\tau\tau} E}}, \quad \text{bet} \quad \bar{\lambda}_w \geq 0,346 \frac{s_p}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}},$$

$$\text{čia } k_{\tau} = 5,34 + \frac{2,10}{t} \left(\frac{\Sigma I_s}{s_d} \right)^{1/3},$$

čia I_s – atskiros išilginės sąstandos skerspjuvio ploto inercijos momentas apie 5.4 pav. parodytą $a-a$ ašį; s_d – bendrasis išklotinis sienelės nuožulnumos aukštis, parodytas 6.5 pav.; s_p – didžiausiojo plokščiojo sienelės elemento nuožulnumos aukštis, žr. 6.5 pav.; s_w – sienelės nuožulnumos aukštis tarp kampų vidurinių taškų, parodytų 5.4 pav.



5.3 pav. Tariamasis sienelės plokščiasis plotis b_p (b_p = nuožulnumos ilgis s_w) (5.1 pav., c, LST EN 1993-1-3)



5.4 pav. Sienelė su išilginėmis sąstandomis (pagal LST EN 1993-1-3)

Sukamasis momentas

Į elemento sąsūką turi būti atsižvelgta, kai apkrovos veikia ne skerspjuvio šlyties centre.

Skaičiuojant įtempius ašinių jėgų ir lenkimo momento sukelti įtempiai turi būti skaičiuojami naudojant efektyviojo skerspjuvio rodiklius, skersinių jėgų, sukimo ir persimetimo (*warping*) sukelti tiesioginiai ir šlyjamieji įtempiai turi būti skaičiuojami naudojant bendrojo skerspjuvio rodiklius.

Sukamieji skerspjuviai turi atitikti sąlygas:

$$\begin{aligned}\sigma_{tot,Ed} &\leq f_{ya} / \gamma_{M0}, \\ \tau_{tot,Ed} &\leq \frac{f_{ya} / 3}{\gamma_{M0}}, \\ \sqrt{\sigma_{tot,Ed}^2 + 3 \tau_{tot,Ed}^2} &\leq 1,1 \frac{f_{ya}}{\gamma_{M0}},\end{aligned}$$

čia $\sigma_{tot,Ed}$ – apskaičiuotieji atitinkamo efektyviojo skerspjuvio skaičiuotiniai suminiai normaliniai įtempiai; $\tau_{tot,Ed}$ – apskaičiuotieji bendrojo skerspjuvio skaičiuotiniai suminiai šlyjamieji įtempiai.

Suminiai normaliniai ir šlyjamieji įtempiai apskaičiuojami taip:

$$\begin{aligned}\sigma_{tot,Ed} &= \sigma_{N,Ed} + \sigma_{My,Ed} + \sigma_{Mz,Ed} + \sigma_{w,Ed}, \\ \tau_{tot,Ed} &= \tau_{Vy,Ed} + \tau_{Vz,Ed} + \tau_{t,Ed} + \tau_{w,Ed},\end{aligned}$$

čia $\sigma_{N,Ed}$ – ašinės jėgos sukelti skaičiuotiniai normaliniai įtempiai (naudojant efektyvųjų skerspjuvį); $\sigma_{My,Ed}$, $\sigma_{Mz,Ed}$ – lenkiamųjų momentų sukelti skaičiuotiniai normaliniai įtempiai (naudojant efektyvųjų skerspjuvį); $\sigma_{w,Ed}$ – persimetimo sukelti skaičiuotiniai normaliniai įtempiai (naudojant bendrąjį skerspjuvį); $\tau_{Vy,Ed}$, $\tau_{Vz,Ed}$ – skersinių jėgų sukelti skaičiuotiniai šlyjamieji įtempiai (naudojant bendrąjį skerspjuvį); $\tau_{t,Ed}$ – tolygaus (Sen Venano) sukimo sukelti skaičiuotiniai šlyjamieji įtempiai (naudojant bendrąjį skerspjuvį); $\tau_{w,Ed}$ – persimetimo sukelti skaičiuotiniai šlyjamieji įtempiai (naudojant bendrąjį skerspjuvį).

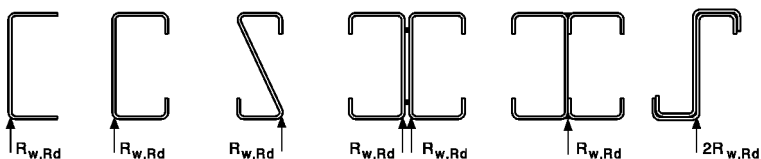
Vietinės skersinės jėgos

Norint, kad nebūtų atraminės reakcijos ar kitos per juostą veikiančios vietinės skersinės jėgos, veikiamos sienelės suspaudimo ar suklupdymo, skersinė jėga turi atitikti sąlygą:

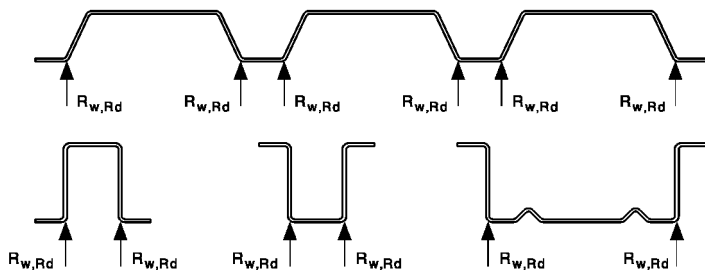
$$F_{Ed} \leq R_{w,Rd} ,$$

čia F_{Ed} – vietinė skersinė jėga; $R_{w,Rd}$ – vietinės skersinės jėgos veikiamos sienelės laikomoji galia.

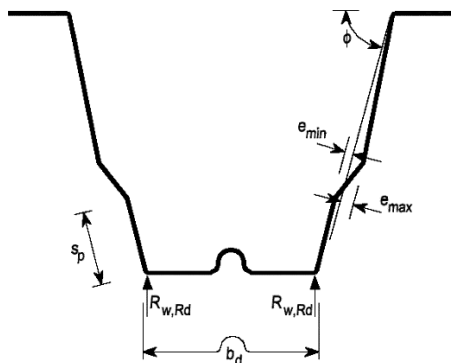
LST EN 1993-1-3 6.1.7 dalyje pateikiamas skaičiavimas, kai yra nestandintieji skerspjūviai (5.5 ir 5.6 pav.) ir standintieji skerspjūviai (5.7 pav.).



5.5 pav. Viensienių skerspjūvių pavyzdžiai (6.6 pav. iš LST EN 1993-1-3)



5.6 pav. Dvisienių ir daugiasienių skerspjūvių su nestandintosiomis sienelėmis pavyzdžiai (6.8 pav. iš LST EN 1993-1-3)



5.7 pav. Standintosios sienelės (6.10 pav. iš LST EN 1993-1-3)

Tempimas ir lenkimas kartu

Skerspjuviai, kuriuos kartu veikia tempimas ir lenkimas, turi atitikti šias sąlygas:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd,ten}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd,ten}} \leq 1,$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd,com}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd,com}} - \frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,$$

čia $N_{t,Rd}$ – skaičiuotinė skerspjuvio tolygioji tempiamoji galia; $M_{cy,Rd,ten}$, $M_{cy,Rd,com}$ – skaičiuotinė skerspjuvio, lenkiamo tik apie y - y ašį, lenkiamoji galia, nustatyta pagal didžiausiuosius tempiamuosius ir gniuždomuosius įtempius; $M_{cz,Rd,ten}$, $M_{cz,Rd,com}$ – skaičiuotinė skerspjuvio, lenkiamo tik apie atitinkamai z - z ašį, lenkiamoji galia, nustatyta pagal didžiausiuosius tempiamuosius ir gniuždomuosius įtempius.

Gniuždymas ir lenkimas kartu

Skerspjuviai, kuriuos veikia kartu gniuždymas ir lenkimas, turi atitikti šias sąlygas:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd,com}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd,com}} \leq 1,$$

$$\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd,ten}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd,ten}} - \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,$$

čia papildomieji momentai, atsirandantys dėl sunkio centro ašių poslinkio, apskaičiuojami taip:

$$\Delta M_{y,Ed} = N_{Ed} e_{Ny},$$

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} e_{Nz},$$

čia e_{Ny} ir e_{Nz} – sunkio centro ašių y - y ir z - z poslinkis dėl ašinių jėgų, o kiti žymenys aptarti ankstesniame skyrelyje.

Kiti atvejai

Kiti skerspjuvio laikomosios galios tikrinimo atvejai (ašinė jėga, skersinė jėga ir lenkimo momentas kartu, lenkimo momentas, atraminė reakcija arba vietinė apkrova kartu) aptarti LST EN 1993-1-3.

6. KLUMPAMOJI GALIA

Ašinis gniuždymas

LST EN 1993-1-3 šis skyrius pavadintas „Lenkiamasis klupumas“, jame kalbama apie vieną iš klupumo atvejų. Šis klupumo atvejis aptinkamas ir veikiant gniuždymo ašinei jėgai. Lenkiamoji klumpamoji galia $N_{b,Rd}$ apskaičiuojama pagal LST EN 1993-1-3.

Gniuždomasis elementas pagal klupumą turi būti patikrintas taip, kad skaičiuotinė gniuždomos ašinės jėgos (įrašos) N_{Ed} reikšmė turi atitikti nelygybę:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0.$$

Skaičiuotinė gniuždomojo elemento ašinė klumpamoji galia $N_{b,Rd}$ skaičiuojama taip:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}, \text{ 1, 2 ir 3 klasės skerspjūviams,}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}}, \text{ 4 klasės simetriniams skerspjūviams,}$$

čia χ – klupumo koeficientas.

Klupumo koeficientas χ skaičiuojamas taip:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \text{ bet } \chi \leq 1,0,$$

$$\text{čia } \Phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right];$$

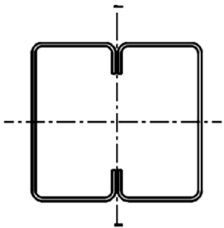
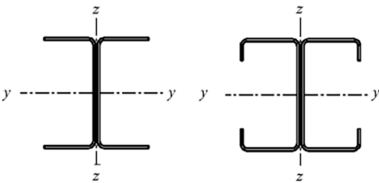
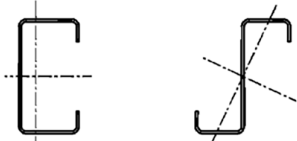
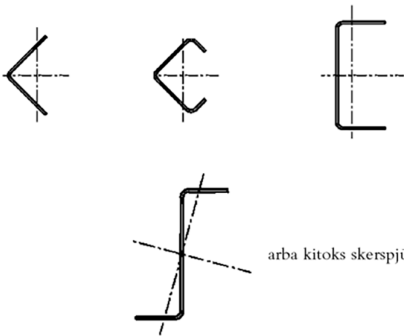
$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}, \text{ 1, 2 ir 3 klasės skerspjūviams,}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}, \text{ 4 klasės skerspjūviams,}$$

čia α nuokrypos koeficientas nustatomas pagal klupumo kreives, o N_{cr} – atitinkamos klupumo formos tamprioji kritinė jėga.

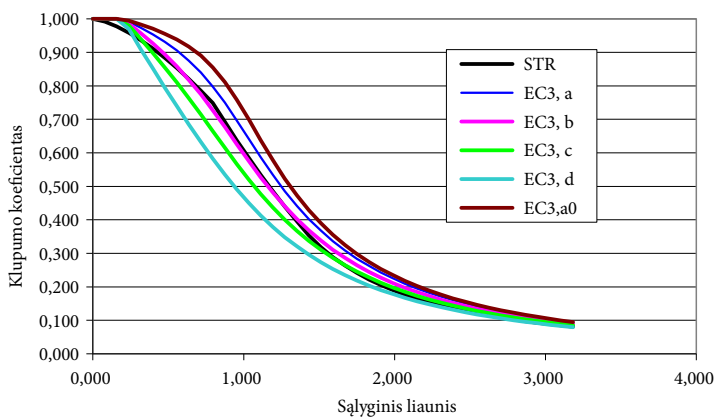
Klupumo kreivės imamos pagal 6.1 pav.

LST EN 1993-1-3 numatytos penkios klupumo kreivės, kurios parodytos 6.2 pav. ir žymimos a_0 , a , b , c ir d . Šiame paveiksle palyginimui pateikta ir centriškai gniuždomo elemento klupumo kreivė, gauta pagal plieninių konstrukcijų skaičiavimo techninį reglamentą (STR).

Skerspjūvio tipas		Klupumas apie ašį	Klupumo kreivė
	jei taikomas f_{yb}	bet kurią	b
	jei taikomas f_{ya} ^{*)}	bet kurią	c
	$y-y$		a
	$z-z$		b
	bet kurią		b
 arba kitoks skerspjūvis	bet kurią		c

^{*)} Vidutinis stipris pagal takumo ribą f_{ya} neturi būti taikomas, nebent $A_{eff} = A_g$.

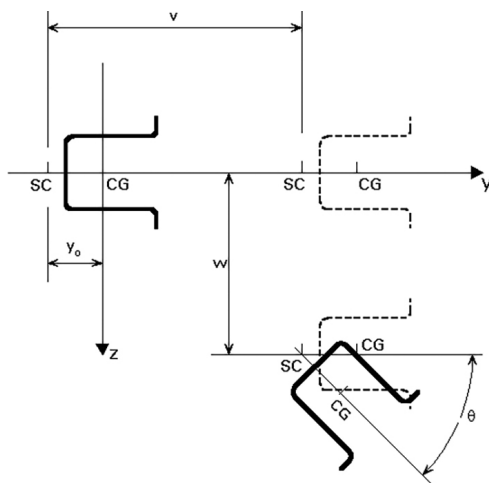
6.1 pav. Įvairius skerspjūvių tipus atitinkančios klupumo kreivės
(6.3 lentelė iš LST EN 1993-1-3)



6.2 pav. Klumpo kreivės

Pagal klumpo kreivę imamos nuokrypų koeficiento reikšmės. Jos pateiktos LST EN 1993-1-3 6.1 lentelėje.

Lenkiamasis klumpas, sukamasis klumpas ir sukamasis lenkiamasis klumpas (6.3 pav.)



6.3 pav. Elemento klumpo atvejai

Lenkiamojo klumpumo sąlyginis liaunis

Liaunis apskaičiuojamas taip:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1}, \text{ 1, 2 ir 3 klasės skerspjūviams,}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}}, \text{ 4 klasės skerspjūviams,}$$

čia L_{cr} – klumpamasis ilgis nagrinėjamoje plokštumoje; i – inercijos momento spindulys aplink atitinkamą ašį, nustatytas pagal bendrojo skerspjūvio plotą;

$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\epsilon$, čia $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$, f_y dimensija yra MPa; $N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2}$ – Eulerio kritinė jėga.

Sukamojo ir sukamojo lenkiamojo klumpumo sąlyginis liaunis

Jei elementai yra atvirojo skerspjūvio, turi būti atsižvelgiama į galimybę, kad elemento sukamoji arba sukamoji-lenkiamoji klumpamoji galia gali būti mažesnė už jo lenkiamąją klumpamąją galią (plačiau LST EN 1993-1-1 ir LST EN 1993-1-3).

Sukamojo ir sukamojo-lenkiamojo klumpumo sąlyginis liaunis $\bar{\lambda}$ turi būti apskaičiuojamas taip:

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}}, \text{ jei skerspjūviai 1, 2 arba 3 klasės,}$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}, \text{ jei skerspjūviai 4 klasės,}$$

čia $N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2}$ (buvo jau parodyta); $N_{cr} \leq N_{cr,TF}$; $N_{cr} \leq N_{cr,T}$; $N_{cr,TF}$ – tampriojo sukamojo-lenkiamojo klumpumo kritinė jėga; $N_{cr,T}$ – tampriojo sukamojo klumpumo kritinė jėga.

$N_{cr,TF}$, $N_{cr,T}$ kritinės jėgos apskaičiuojamos pagal formules, pateikiamas literatūroje. Kai kurie jų apskaičiavimo atvejai duoti LST EN 1993-1-3.

Pavyzdžiui, tamprioji kritinė sukamoji klumpamoji klupties jėga $N_{cr,T}$ turi būti nustatyta taip:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_o^2} \left(G I_t + \frac{\pi^2 E I_w}{l_T^2} \right),$$

čia $i_o^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_o^2 + z_o^2$; G – šlyties modulis; I_t – bendrojo skerspjūvio sukimo konstanta; I_w – bendrojo skerspjūvio persimetimo konstanta; i_y – bendrojo skerspjūvio inercijos spindulys apie y - y ašį; i_z – bendrojo skerspjūvio inercijos spindulys apie z - z ašį; l_T – klumpamasis sukamosios klumpamosios elgsenos profiliuoto ilgis; y_o, z_o – šlyties centro koordinatės bendrojo skerspjūvio sunkio centro atžvilgiu.

Tamprioji kritinė sukamosios-lenkiamosios klumpamosios elgsenos simetriškų y - y ašiai skerspjūvių (pvz., $z_o = 0$) tamprioji kritinė jėga $N_{cr,TF}$ turi būti nustatyta taip:

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2\beta} \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} \right)^2 + 4 \left(\frac{y_o}{i_o} \right)^2 \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right],$$

$$\text{čia } \beta = 1 - \left(\frac{y_o}{i_o} \right)^2.$$

Sukamosios arba sukamosios-lenkiamosios klupties atveju klumpamasis ilgis l_T turi būti nustatytas, atsižvelgiant į sukamojo ir deformacinio įtvirčių abiejuose elemento galuose laipsnį (pvz. žr. 6.13 pav. iš LST EN 1993-1-3).

Elementai su nesimetriniais ketvirtos klasės skerspjūviais turi būti skaičiuojami kaip gniuždomieji lenkiamieji elementai, vertinant papildomą momentą ΔM_{Ed} , atsirandantį dėl neutraliosios ašies persislinkimo pereinant nuo bendrojo skerspjūvio ploto prie efektyviojo skerspjūvio ploto.

Lenkimo veikiami elementai

Lenkiamieji elementai, neturintys šoninio įtvirčio (negali pasislinkti iš lenkimo plokštumos), gali išklupti (žr. paveikslus), todėl jie turi būti patikrinti, ar gali išlaikyti skersinį sukamąjį klumpumą (6.4 pav.).

Šoninio įtvirčio neturintis ir aplink pagrindinę ašį lenkimo veikiamas elementas turi būti patikrinamas, ar gali išlaikyti skersinį sukamąjį klumpumą:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0,$$

čia M_{Ed} – skaičiuotinė momento reikšmė $M_{b,Rd}$ – skaičiuotinė lenkiamosios klumpumo galios reikšmė.

Sijos skaičiuotinė lenkiamoji klupumo galia apskaičiuojama taip:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}},$$

čia W_y – atitinkamas skerspjūvio atsparumo momentas:

- $W_y = W_{pl,y}$, jei skerspjūviai 1 arba 2 klasės;
- $W_y = W_{el,y}$, jei skerspjūviai 3 klasės;
- $W_y = W_{eff,y}$, jei skerspjūviai 4 klasės;

χ_{LT} – skersinio-sukamojo klupumo koeficientas.

Skersinio sukamojo klupumo atveju klupumo koeficientas apskaičiuojamas taip:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, \text{ bet } \chi_{LT} \leq 1,0,$$

$$\text{čia } \Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right];$$

$$\alpha_{LT} - \text{nuokrypos koeficientas; } \bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}.$$

Koeficiento reikšmės imamos pagal atitinkamas skersinio sukamojo klupumo kreives iš 6.1 lentelės.

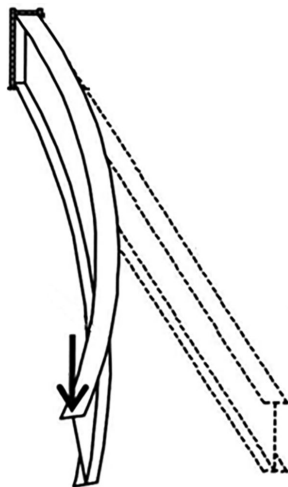
6.1 lentelė. Rekomenduojamosios nuokrypos koeficientų reikšmės pagal atitinkamas skersinio sukamojo klupumo kreives

Klupumo kreivė	a	b	c	d
Nuokrypos koeficientas α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Skersiniam sukamajam klupumui plonasienio profiliuoto skaičiuotinė lenkiamoji klumpamoji galia turi būti nustatyta imant klupumo kreivę b.

M_{cr} skaičiuojamas imant bendrąjį skerspjūvį ir atsižvelgiama į apkrovos sąlygas, tikrąjį momentų pasiskirstymą ir šoninius įtvirčius. Kaip apskaičiuoti išraiškas M_{cr} , galima rasti literatūroje.

Supaprastintas metodas, padedantis nustatyti kai kuriems skerspjūviams skersinę sukamąją laikomąją galią, pateikta LST EN 1993-1-3.



6.4 pav. Geminės sijos veiktos vertikaliuosios jėgos skersinis sukamasis klupumas

Lenkimo ir ašinio gniuždymo veikiami elementai

Elementų, lenkiamų dviejose plokštumose ar vienoje plokštumoje ir gniuždomų ašinės jėgos, elgsena yra labai sudėtinga. Pirmos eilės lenkimo momentus elemente sukelia skersinis lenkimas ir elemento galuose veikiantys momentai. Ašinis gniuždymas sukelia ne tik ašinę jėgą, bet ir antros eilės momentus apie svarbiausias ašis ($P - \delta$ efektas). Taip pat atsiranda papildomų momentų dėl šoninio elemento galų persislinkimo ($P - \Delta$ efektas).

Elementai, kuriuos kartu veikia lenkimas ir ašinis gniuždymas, turi atitikti šias sąlygas:

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,$$

čia $N_{Ed}, M_{y,Ed}, M_{z,Ed}$ – skaičiuotinės gniuždomosios jėgos ir didžiausiųjų momentų atitinkamai aplink y - y ir z - z ašis išilgai elemento reikšmės; $\Delta M_{y,Ed}, \Delta M_{z,Ed}$ – momentai, susidarantys dėl sunkio centro ašies poslinkio nesimetriniams 4 klasės skerspjuviams; χ_y ir χ_z – lenkiamojo klumpumo koeficientai; χ_{LT} – skersinio sukamojo klumpumo koeficientas; $k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$ – sąveikos koeficientai.

Sąveikos koeficientai $k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$ priklauso nuo pasirinkto metodo. Šių koeficientų reikšmės galima imti iš LST EN 1993-1-1 A priedo (1-asis alternatyvusis metodas) arba iš B priedo (2-asis alternatyvusis metodas).

Lankstytiems profiliuociams galima taikyti ir tokią apytikrę formulę:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \right)^{0,8} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \right)^{0,8} \leq 1,0,$$

čia $N_{b,Rd}$ – skaičiuotinė klumpamoji gniuždomojo elemento galia (lenkiamojo, sukamojo arba sukamojo lenkiamojo klumpumo atvejais); $M_{b,Rd}$ – skaičiuotinė lenkiamojo galia.

7. TINKAMUMO RIBINIAI BŪVIAI

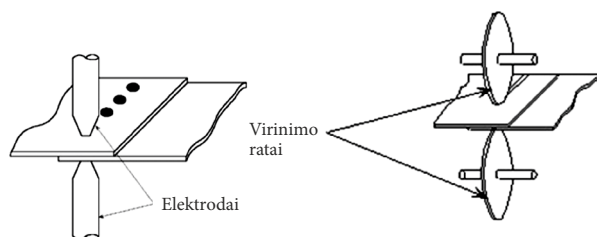
Poslinkiai turi būti skaičiuojami taikant efektyviojo skerspjuvio rodiklius. Įlinkiai gali būti skaičiuojami tarus, kad yra tamprioji elemento elgsena.

8. JUNGČIŲ PROJEKTAVIMAS

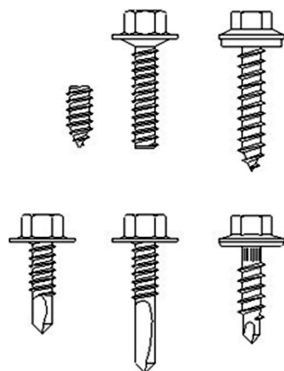
Bendrieji mazgų projektavimo principai ir skaičiavimo metodai pateikti LST EN 1993-1-8. Mazgų iš plonasienių skerspjuvių projektavimo specifi­ka pateikia­ma LST EN 1993-1-3. Šią metodiką visada reikia taikyti, kai jungiamų elementų ar atskirų jų dalių storis $t \leq 4$ mm.

Mazgai gali būti projektuojami naudojant:

- suvirinimą (8.1 pav.):
 - vientisosios siūlės;
 - taškinės siūlės;
- junges (8.2, 8.3 pav.):
 - varžtai;
 - savisriegiai sraigtai;
 - kniedės;
 - smeigės;
- kitus būdus (klijavimo ir t. t.).

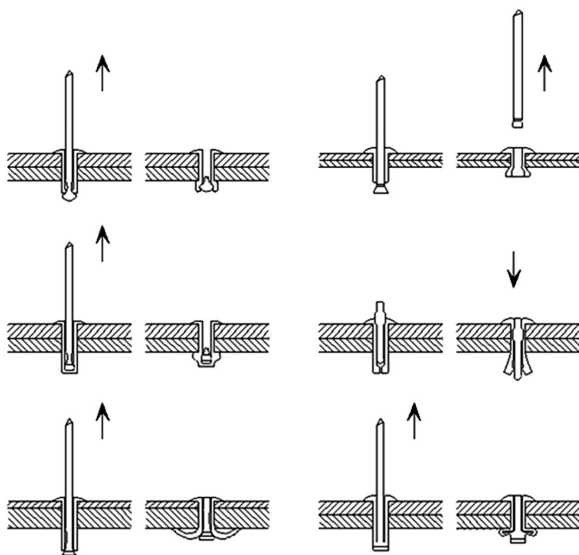


8.1 pav. Kai kurie plonasienių elementų virinimo būdai

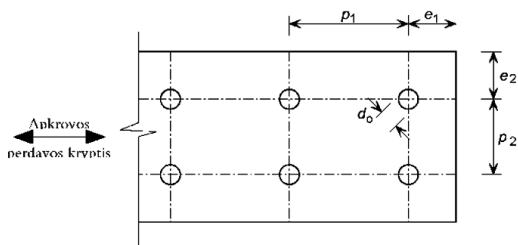


8.2 pav. Varžtai plonasienių elementų jungtims

Jei naudojamos jungės ar virintinės taškinės siūlės, yra nustatomi didžiausieji ir mažiausieji atstumai tarp jungių ar virintinių siūlių taškų (8.4 pav.). Kniedžių, savisriegių sraigtų, smeigių, varžtų laikomosios galios pateikiamos LST EN 1993-1-38.1–8.4 lentelėse, taškinio suvirinimo – LST EN 1993-1-38.5 lentelėje.



8.3 pav. Kniedės plonasienių elementų jungtims



8.1 paveikslas. Jungių ir taškinių virintinių siūlių atstumai iki galo, iki krašto ir tarp jų

8.4 pav. 8.1 pav. iš LST EN 1993-1-3

9. STOGO ILGINIAI

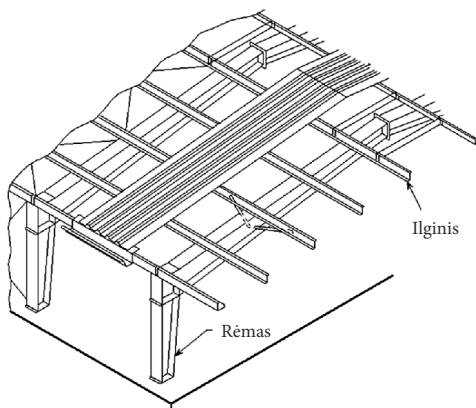
Bendrieji duomenys apie ilginius

Stogo ilginiai – viena iš laikančių stogo konstrukcijos elementų (žr. 9.1 pav.)

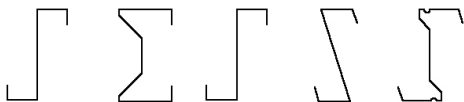
Ilginiai yra lenkiami elementai ir jų skerspjūviai yra tokie pat kaip lenkiamųjų elementų. Ilginiams dažniausiai taikomi skerspjūviai parodyti 9.2 pav.

Kad neatsirastų papildomas sukimo momentas, apkrova turi būti pridėta kuo arčiau šlyties centro. Toks galėtų būti sigma skerspjūvis (žr. 9.2 pav. 2 skerspjūvį).

Priklausomai nuo atrėmimo sąlygų ilginiai gali būti vieno arba kelių tarpatramių. Kelių tarpatramių (vientisųjų) ilginių jungtims naudojamos movinės (*sleeve sistem*) arba užleistinės (*overlap system*) jungtys (žr. 9.3 pav.). Taikant movinę jungtį, du ilginiai tarpusavyje sujungiami trumpa mova (jungiamuoju elementu) suglaudžiant abiejų ilginių galus. Taikant užleistinę jungtį, vieno



9.1 pav. Stogo konstrukcijos pavyzdys

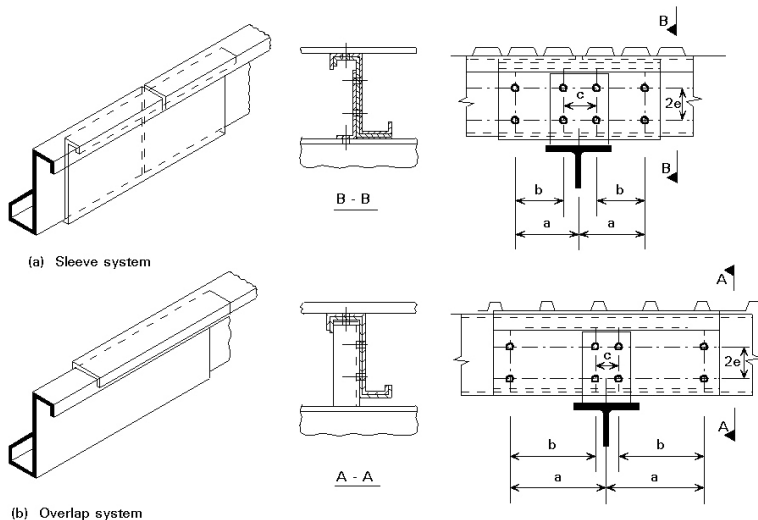


9.2 pav. Kai kurie ilginių skerspjūviai

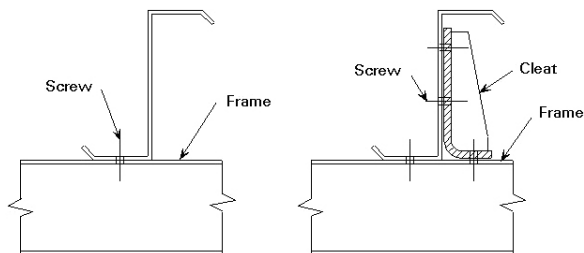
ilginio galas uždedamas ant kito ilginio galo ir taip abiejų ilginių sienelės prisiglaudžia viena prie kitos.

Ilginiai prie rėmų ar santvarų dažniausiai tvirtinami tiesiogiai jungėmis. Taip pat ilginiai gali būti tvirtinami ir per tarpinį elementą (9.4 pav.).

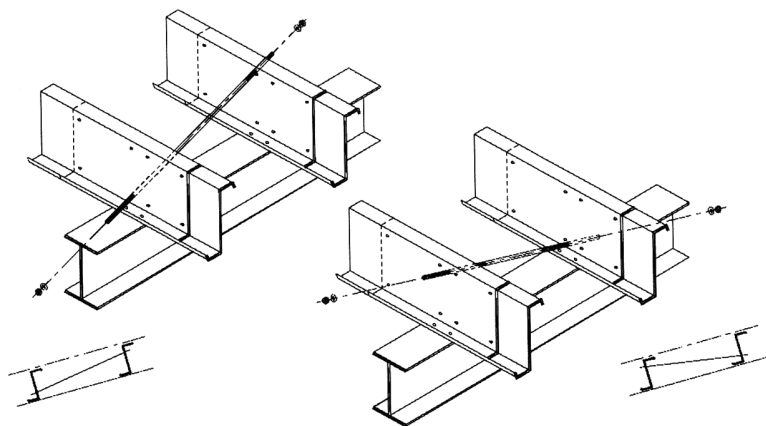
Ilginiai gali netekti pastovumo nuo skersinio sukamojo pastovumo netekimo. Siekiant išvengti skersinio sukamojo pastovumo netekimo, ilginiai gali būti tarpusavyje sujungti stygomis (tie) arba lanksčiais elementais. Dažniausiai naudojamos stygos (9.5 pav.), kurios stabilizuoja laisvą juostą. Styga dirba tik tempimui. Lankstieji elementai neleidžia ilginiui susisukti, atlaiko ir tempimo ir gniuždymo jėgas.



9.3 pav. Vientisųjų ilginių jungtys (Projektas ESDEP Course 2008)



9.4 pav. Ilginių tvirtinimas (Projektas ESDEP Course 2008)



9.5 pav. Skersinio sukamojo pastovumo prevencija

Ilginių skaičiavimas

Eurokode atskirai aptariamas vieno ir dviejų tarpatramių ilginių skaičiavimas. Ilginių skaičiavimas priklauso nuo apkrovos pobūdžio ir tarpatramių skaičiaus.

Vieno tarpatramio ilginiai, veikiami:

- sunkio jėgų (t. y. nuo apkrovų, nukreiptų sunkio jėgos veikimo kryptimi), turi atitikti skerspjūvio laikomosios galios kriterijus ir gniuždomos laisvosios juostos pastovumo kriterijus;
- keliamųjų apkrovų (pvz., vėjo keliamosios apkrovos), turi atitikti skerspjūvio laikomosios galios kriterijus ir gniuždomos laisvosios juostos pastovumo kriterijus.

Dviejų tarpatramių ilginiai:

- lenkiamieji momentai nekarpytame ilginyje gali būti apskaičiuojami arba gaunami iš bandymų rezultatų;
- lenkiamieji momentai skaičiuojami taikant visuminę tampriąją analizę;
- veikiami sunkio jėgos, turi atitikti skerspjūvio laikomosios galios kriterijus ir gniuždomos laisvosios juostos pastovumo kriterijus; taip pat ties vidurine atrama turi būti patikrintas bendras lenkiamojo momento ir atraminės reakcijos poveikis bei lenkiamojo momento ir skersinės jėgos poveikis;
- veikiami keliamosios apkrovos, turi atitikti skerspjūvio laikomosios galios kriterijus ir gniuždomos laisvosios juostos pastovumo kriterijus; taip pat turi būti patikrintas bendras lenkimo momento ir skersinės jėgos povei-

kis; į bendrą lenkimo momento ir reakcijos poveikį atsižvelgti nereikia, nes reakcija šiuo atveju yra tempiamoji jėga.

Stogo konstrukcijose ant šaltai lankstytų plonasienių ilginių tvirtinami lakštiniai profiliuočiai, kurie ilginiui suteikia standumo. Toks skaičiavimas vadinamas lakštiniais profiliuočiais suvaržytų ilginių skaičiavimu. Šis skaičiavimas pagal LST EN 1993-1-3 taikytinas Z , C , Σ , U ir Ω skerspjuvių ilginiams.

Dėl lakštinio profiliuočio skersinį įtvirtį turinčio ilginio elgsena modeliuojama, kaip parodyta 9.6 pav. Gali būti laikoma, kad ilginio jungtis su lakštiniu profiliuočiu iš dalies suvaržo ilginį nuo sąsūkos. Šį dalinį sukamąjį įtvirtį atstoja sukamoji spyruoklė, turinti spyruoklinį standį C_D . Supaprastinant skaičiavimus, sukamasis spyruoklinis standis C_D gali būti pakeičiamas šoniniu spyruokliniu standžiu K .

Laikomoji galia

Kai ilginį veikia ašinė jėga ir skersinė apkrova, skerspjuvio laikomoji galia turi būti patikrinama, kaip parodyta 9.7 pav., sudedant įtempius, atsirandančius dėl:

- plokštumoje veikiančio lenkiamojo momento $M_{y,Ed}$;
- ašinės jėgos N_{Ed} (jei yra ašinė jėga);
- sukimo ir šoninio lenkimo sukeltos lygiavertės skersinės apkrovos $q_{h,Ed}$ veikiančios laisvąją juostą.

Didžiausieji skerspjuvio įtempiai turi atitikti šias sąlygas:

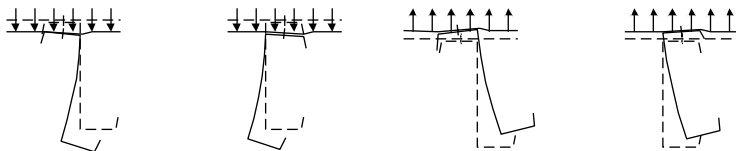
- suvaržytos juostos įtempiai:

$$\sigma_{\max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \leq f_y / \gamma_M;$$

- laisvosios juostos įtempiai:

$$\sigma_{\max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq f_y / \gamma_M;$$

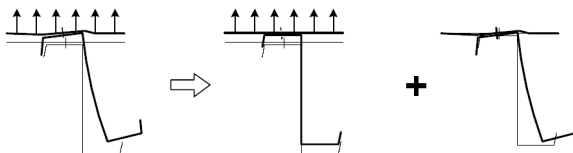
čia A_{eff} – efektyvusis skerspjuvio plotas, atsižvelgiant tik į tolygų gniuždymą; f_y – stipris pagal takumo ribą; $M_{fz,Ed}$ – laisvosios juostos lenkiamasis momentas, sukeliamas skersinės apkrovos $q_{h,Ed}$; $W_{eff,y}$ – efektyvusis skerspjuvio atsparumo momentas, tik kai lenkiama apie y - y ašį; W_{fz} – suminis tamprusis laisvosios juostos ir padedančiosios sienelės dalies skerspjuvių atsparumo momentas, tik kai lenkiama apie z - z ašį; jei neatliekama tikslesnė analizė, padedančioji sienelės dalis gali būti lygi 1/5 sienelės aukščio, matuojamo nuo sienelės ir juostos sankirtos taško, C ir Z formos profiliuočių atveju, arba 1/6 sienelės aukščio Σ profiliuočių atveju (9.7 pav.).



Sunkio jėga

Keliamoji apkrova

a) Z ir C formos skerspjūvio ilginis, kurio viršutinė juosta pritvirtinta prie lakštinio profiliuotčio

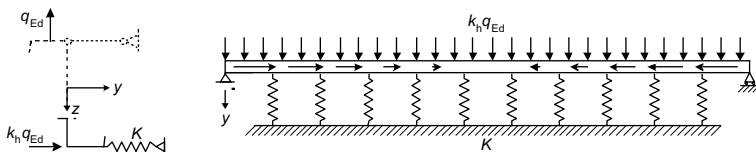


Lenkimas plokštumoje Sukimas ir šoninis lenkimas

b) Visuminė deformacija, padalyta į dvi dalis



c) Ilginio modelis su šoniniu ryšiu, kurį suteikia sukamasis spyruoklinis lakštinio profiliuotčio įtvirtis C_b .

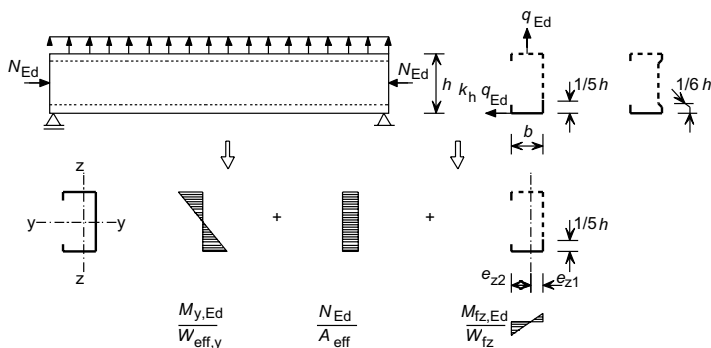


d) Supaprastinant sukamasis spyruoklinis standis C_b pakeičiamas šoniniu spyruokliniu standžiu K .

e) Laisvoji ilginio juosta, su modeliuota kaip sija ant tampriojo pagrindo. Modelis perteikia sukimo ir šoninio lenkimo (įskaitant skerspjūvio iškreipą) poveikį vienam tarpatramiui, kurio neveikia keliamoji apkrova.

10.1 pavykslas. Ilginių su šoniniais ryšiais ir lakštinio profiliuotčio suteikiamu sukamuoju įtvirtėiu modeliavimas

9.6 pav. 10.1 pav. iš LST EN 1993-1-3



10.2 paveikslas. Įtempių sudėtis

9.7 pav. 10.2 pav. iš LST EN 1993-1-3

Sukimo ir šoninio lenkimo sukelta lygiavertė skersinė apkrova $q_{h,Ed}$, veikianti laisvąją juostą, nustatoma taip:

$$q_{h,Ed} = k_h q_{Ed}$$

Įprastų tipų skerspjūvių koeficientas k_h nustatomas, kaip nurodyta 9.8 pav. Skersinis lenkiamasis momentas $M_{fz,Ed}$ apskaičiuojamas taip:

$$M_{fz,Ed} = \kappa_R M_{0,fz,Ed}$$

čia $M_{0,fz,Ed}$ – pradinis laisvosios juostos, neturinčios jokios spyruoklinės atramos, skersinis lenkiamasis momentas (9.9 pav.); κ_R – pataisos dėl efektyviosios spyruoklinės atramos koeficientas (9.9 pav.).

Spyruoklinės atramos koeficiento R reikšmė apskaičiuojama taip:

$$R = \frac{KL_a^4}{\pi^4 EI_{fz}},$$

čia I_{fz} – suminio laisvosios juostos ir padedančiosios sienelės dalies skerspjūvio ploto inercijos momentas; K – šoninis spyruoklinis vienetinio ilgio standis; L_a – atstumas tarp prieššvirinių strypų arba, jei jų nėra, ilginio tarpatramis L .

Suminis vienetinio ilgio skersinis spyruoklinis standis K apskaičiuojamas taip:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_C},$$

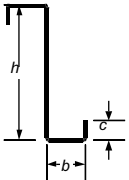
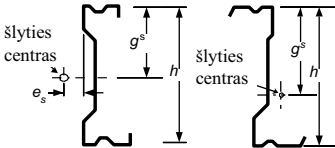
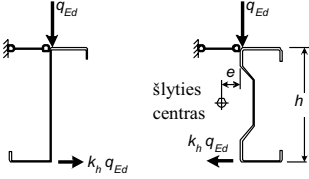
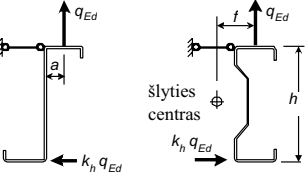
čia K_A – skersinis standis, atitinkantis lakštinio profiliuoto ir ilginio mazgo

sukamąjį standį; K_B – skersinis standis dėl ilginio skerspjuvio iškreipos; K_C – skersinis standis dėl lakštinio profiliuoto lenkiamojo standžio.

Galima tarti, kad įprasta nepaisyti $1/K_C$, nes K_C yra labai didelis, palyginti su K_A ir K_B . Tuomet K reikšmė apskaičiuojama taip:

$$K = \frac{1}{\left(1/K_A + 1/K_B\right)},$$

čia $(1/K_A + 1/K_B)$ reikšmė gali būti nustatyta bandymais arba apskaičiuojama.

 $k_{h0} = \frac{ht(b^2 + 2cb - 2c^2b/h)}{4I_y}$ Paprastasis simetrišnis Z formos profiliuotis	 $k_{h0} = \frac{I_{yz}}{I_y} \frac{g_s}{h}$ Z, C arba Σ formos profiliuotiai
a) k_{h0} koeficientas, kai skersinė apkrova veikia apatinę laisvąją juostą (k_{h0} atitinka apkrovos perdavą šlyties centre)	
 $k_h = k_{h0}$ $k_h = k_{h0} + e/h$ (*)	 $k_h = k_{h0} - a/h$ (**) $k_h = k_{h0} - t/h$ (***)
b) sunkio jėgos apkrova	c) keliamoji apkrova
Lygiavertės skersinės apkrovos koeficientas k_h	

(*) Jei šlyties centras yra dešinėje q_{Ed} apkrovos pusėje, apkrova veikia priešinga kryptimi.

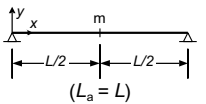
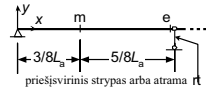
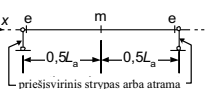
(**) Jei $a/h > k_{h0}$, apkrova veikia priešinga kryptimi.

(***) t reikšmė vartojama tik tuomet, kai q_{Ed} yra tarp viršutinės juostos kraštų.

10.3 paveikslas. Sukimo ir šoninio lenkimo pakeitimas lygiaverte skersine apkrova $k_h q_{Ed}$

9.8 pav. 10.3 pav. iš LST EN 1993-1-3

10.1 lentelė. Pradinio lenkiamojo momento $M_{0,fz,Ed}$ ir pataisos koeficiento κ_R reikšmės

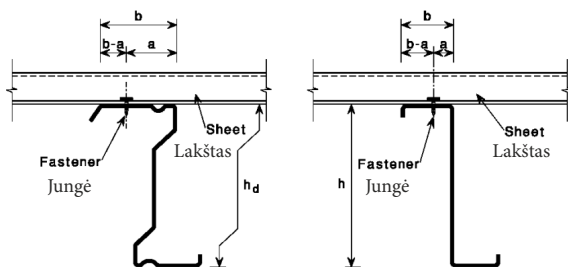
Sistema	Vieta	$M_{0,fz,Ed}$	κ_R
	m	$\frac{1}{8} q_{b,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 - 0,0225R}{1 + 1,013R}$
	m	$\frac{9}{128} q_{b,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 - 0,0141R}{1 + 0,416R}$
	e	$-\frac{1}{8} q_{b,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 + 0,0314R}{1 + 0,396R}$
	m	$\frac{1}{24} q_{b,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 - 0,0125R}{1 + 0,198R}$
	e	$-\frac{1}{12} q_{b,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 + 0,0178R}{1 + 0,191R}$

9.9 pav. 10.1 lent. iš LST EN 1993-1-3

Vienetinio ilgio skersinis spyruoklinis standis K gali būti apskaičiuojamas taip:

$$\frac{1}{K} = \frac{4(1-\nu^2)h^2(h_d + b_{\text{mod}})}{Et^3} + \frac{h^2}{C_D},$$

čia b_{mod} nustatomas pagal LST EN 1993-1-3 10.1.5.1 skyrių; t – ilginio storis; C_D – suminis sukamasis spyruoklinis standis; h – bendrasis ilginio aukštis; h_d – išsklotinis ilginio sienelės aukštis (9.10 pav.).



9.10 pav. 10.6 pav. iš LST EN 1993-1-3. Ilginis ir pritvirtintas lakštinis profiliuotasis

Suminis sukamasis spyruoklinis standis C_D apskaičiuotas taip:

$$C_D = \frac{1}{\left(1/C_{D,A} + 1/C_{D,C}\right)},$$

čia $C_{D,A}$ – lakštinio profiliuotio ir ilginio jungties sukamasis standis; $C_{D,C}$ – sukamasis standis, atitinkantis lakštinio profiliuotio lenkiamąjį standį.

Jei lakštų su ilginiais jungiančios jungtės yra ilginio juostos viduryje, trapecinių lakštinių profiliuotųjų, prijungtų prie ilginio viršutinės juostos, $C_{D,A}$ reikšmė gali būti nustatyta, kaip pateikta LST EN 1993-1-3 10.1.5.2 skyriuje:

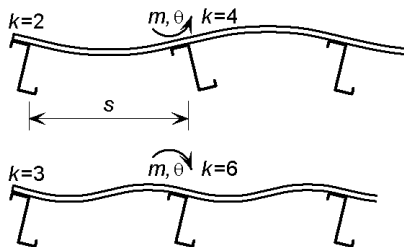
$$C_{D,A} = C_{100} k_{ba} k_t k_{bR} k_A k_{bT}.$$

Su atsarga $C_{D,C}$ reikšmė dar gali būti apskaičiuojama taip:

$$C_{D,C} = \frac{k E I_{eff}}{s},$$

čia k – skaitinis koeficientas (9.11 pav.); I_{eff} – efektyvusis vienetinio pločio lakštinio profiliuotio skerspjūvio ploto inercijos momentas; s – ilginių žingsnis.

Galima nepaisyti $C_{D,C}$, nes spyruokliniam standžiui didžiausią poveikį turi $C_{D,A}$ reikšmė ir skerspjūvio iškreipa.



9.11 pav. 10.7 pav. iš LST EN 1993-1-3. $C_{D,C}$ skaičiavimo modelis

Klumpamoji laisvosios juostos galia

Jei laisvoji juosta yra gniuždoma, jos klumpamoji galia patikrinama taip:

$$\frac{1}{\chi_{LT}} \left(\frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \right) + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq f_{yb} / \gamma_{M1},$$

čia χ_{LT} – skersinio sukamojo klumpumo (lenkiamojo laisvosios juostos klumpumo)

koeficientas, kuris nustatomas pagal tokią išraišką:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{fz}^2}}, \quad \text{bet} \quad \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1,0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{fz}^2} \end{cases},$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{fz} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{fz}^2 \right].$$

Jei sąlyginis liaunis apskaičiuojamas, kaip parodyta toliau, rekomenduojama remtis klupumo kreive b ($\alpha_{LT} = 0,34$; $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$; $\beta = 0,75$):

$$\bar{\lambda}_{fz} = \frac{l_{fz} / i_{fz}}{\lambda_1},$$

čia $\lambda_1 = \pi \left[E / f_{yb} \right]^{0,5}$; l_{fz} – laisvosios juostos klumpamasis ilgis (LST EN 1993-1-1 10.1.4.2 skyrius); i_{fz} – suminio laisvosios juostos ir padedančiosios sienelės dalies skerspjuvio ploto inercijos spindulys, kai lenkiama apie z - z ašį.

Įlinkiai

Įlinkiai skaičiuojami tariant, kad ilginio elgsena yra tampri. Skaičiuojant įlinkius turi būti atsižvelgiama į slydimo jungtyse galimybę (pvz., kelių tarpatramių ilginuose su jungtimis, kurios įrengiamos naudojant movas ar užlaidas).

Supaprastintas ilginių skaičiavimas

C , Z ir Σ formos skerspjuvio ilginiai gali būti projektuojami pagal supaprastintą metodiką, jei atitinka šias sąlygas:

- skerspjuvio matmenys yra tarp 9.12 pav. nurodytų ribų;
- ilginių tarpatramiai vienodi ir jie veikiami tolygiai išskirstyta apkrova;
- ilginius nuo sąsūkos sutvirtina trapeciniai lakštiniai profiliuočiai;
- ilginius gulsčiojoje plokštumoje įtvirtina trapeciniai lakštiniai profiliuočiai, jei gulsčiasis įtvirtis atitinka (LST EN 1993-1-3 10.1) lygties sąlygas.

Pagal šią sąlygą gali būti tariama, kad jungties vietoje ilginis turi skersinį įtvirtį lakštinio profiliuočio plokštumoje:

$$S \geq \left(EI_w \frac{\pi^2}{L^2} + GI_t + EI_z \frac{\pi^2}{L^2} 0,25 h^2 \right) \frac{70}{h^2},$$

čia S – šlyties standžio dalis, kurią nagrinėjamam profiliuočiu suteikia lakštiniai profiliuočiai, prijungti kiekviena savo banga (jei lakštiniai profiliuočiai prijungti

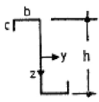
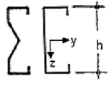
prie ilginio tik kas antra banga, S turi būti pakeičiama į $0,20S$); šlyties standis S gali būti apskaičiuojamas remiantis ECCS rekomendacijomis arba nustatomas bandymais; I_w – ilginio persimetimo konstanta; I_t – ilginio sukimo konstanta; I_z – skerspjūvio ploto inercijos momentas apie silpnąją ilginio skerspjūvio ašį; L – ilginio tarpatramis; H – ilginio aukštis.

Šis metodas neturi būti taikomas:

- sistemoms su priešįsviriniais strypais;
- movinėms arba užlaidinėms sistemoms;
- veikiant ašinėms jėgoms N_{Ed} .

E.1 lentelė. Supaprastinto projektavimo metodo taikymo apribojimai ir kitos 5.2 poskyrio 5.1 lentelėje nustatytos ribos

(y ašis yra lygiagreti su viršutine juosta, o z ašis – jai statmena)

Ilginiai	t [mm]	b/t	h/t	h/b	c/t	b/c	L/h
	$\geq 1,25$	≤ 55	≤ 160	$\leq 3,43$	≤ 20	$\leq 4,0$	≥ 15
	$\geq 1,25$	≤ 55	≤ 160	$\leq 3,43$	≤ 20	$\leq 4,0$	≥ 15

9.12 pav. E.1 lent. iš LST EN 1993-1-3

Skaičiuojant ilginius supaprastintu metodu, turi būti tenkinama tokia sąlyga:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{LT,Rd}} \leq 1,$$

čia $M_{LT,Rd} = \left(\frac{f_y}{\gamma_{M1}} \right) W_{eff,y} \frac{\chi_{LT}}{k_d}$; χ_{LT} – skersinio sukamojo klupumo koeficientas, apskaičiuojamas kaip lenkiamųjų elementų skersinis sukamasis klupumas (žr. LST EN 1993-1-1) ir tariant, kad priklauso nuo

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{eff,y} f_y}{M_{cr}}}.$$

Skaiciuojant χ_{LT} , α_{LT} pakeičiamas į $\alpha_{LT,eff}$:

$$\alpha_{LT,eff} = \alpha_{LT} \sqrt{\frac{W_{el,y}}{W_{eff,y}}},$$

čia α_{LT} – nuokrypio koeficientas; $W_{el,y}$ – bendrojo skerspjūvio atsparumo momentas y - y ašies atžvilgiu; $k_d = \left(a_1 - a_2 \frac{L}{h}\right)$, bet $\geq 1,0$ – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į įtvirčio neturinčią ilginio dalį; a_1 , a_2 – koeficientai iš 9.13 pav.; L – ilginio tarpatramis; h – bendrasis ilginio aukštis.

E.2 lentelė. (E.5) lygties koeficientai a_1 ir a_2

Sistema	Z formos ilginiai		C formos ilginiai		Σ formos ilginiai	
	a_1	a_2	a_1	a_2	a_1	a_2
Vieno tarpatramio sija, sunkio apkrova	1,0	0	1,1	0,002	1,1	0,002
Vieno tarpatramio sija, keliamoji apkrova	1,3	0	3,5	0,050	1,9	0,020
Nekarpytoji sija, sunkio apkrova	1,0	0	1,6	0,020	1,6	0,020
Nekarpytoji sija, keliamoji apkrova	1,4	0,010	2,7	0,040	1,0	0

9.13 pav. E.2 lent. iš LST EN 1993-1-3

Tamprusis kritinis skersinis sukamasis klumpamasis momentas gali būti apskaičiuotas taip:

$$M_{cr} = \frac{k}{L} \sqrt{G I_t^* E I_v},$$

čia: I_t^* – netikrasis skerspjūvio ploto Sen Venano sukamasis inercijos momentas:

$$I_t^* = I_t + C_D \frac{L^2}{\pi^2 G};$$

I_t – ilginio skerspjūvio ploto Sen Venano sukamasis inercijos momentas; $1/C_D = \frac{1}{C_{D,A}} + \frac{1}{C_{D,B}} + \frac{1}{C_{D,C}}$; $C_{D,A}$, $C_{D,C}$, $C_{D,B}$ – sukamasis standis pagal LST EN 1993-1- 10.1.5.1 ir 10.1.5.2 punktus; k – skersinio sukamojo klumpumo koeficientas iš 9.14 pav.

E.4 lentelė. Gulsčiąji viršutinės juostos įtvirtį turinčių ilginių skersinio sukamojo klumpo koeficientas k

Statinė sistema	Sunkio apkrova	Keliamoji apkrova
	∞	10,3
	17,7	27,7
	12,2	18,3
	14,6	20,5

9.14 pav. E.4 lent. iš LST EN 1993-1-3

Klumpo koeficientas gali būti imamas toks:

$$\chi_{LT} = 1,0,$$

jei yra vieno tarptračio sija, kurią veikia sunkio apkrova arba galioja sąlyga:

$$C_D \geq \frac{M_{el,u}^2}{EI_v} k_g,$$

čia $M_{el,u} = W_{el,u} f_y$ – tamprioji bendrojo skerspjūvio lenkiamoji galia pagrindinės $u-u$ ašies atžvilgiu; I_v – bendrojo skerspjūvio ploto inercijos momentas silpnosios $v-v$ ašies atžvilgiu; k_g – koeficientas, skirtas atsižvelgti į statinę ilginių sistemą pagal 9.15 pav.

Kai C ir Σ ilginių juostos yra vienodos, $I_v = I_z$, $W_u = W_y$ ir $M_{el,u} = M_{el,y}$.

E.3 lentelė. Koeficientai k_g

Statinė sistema	Sunkio apkrova	Keliamoji apkrova
	—	0,210
	0,07	0,029
	0,15	0,066
	0,10	0,053

9.15 pav. E.3 lent. iš LST EN 1993-1-3

10. KOLONOS

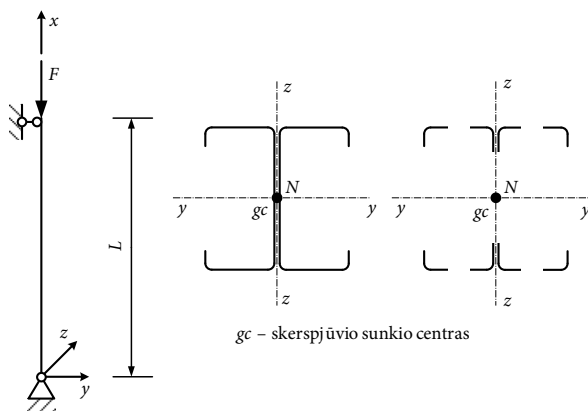
Ašinės jėgos veikiamos kolonos

Ašinės jėgos veikiamoms kolonomis naudojami įprastiniai plonasieniai skerspjūviai (žr. 1.2). Dažniausiai ašinės jėgos gniuždomiems elementams naudojami simetriniai skerspjūviai (6.1 pav.).

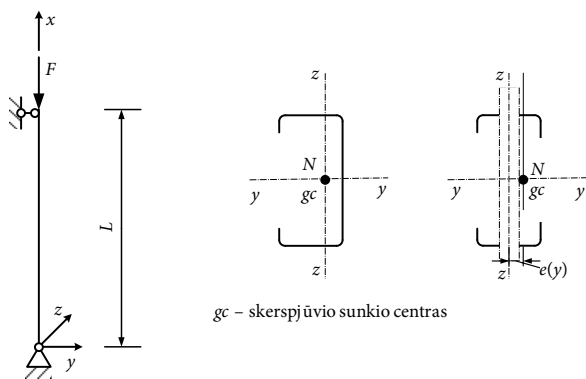
Plonasienių skerspjūvių ašinės jėgos veikiamų kolonų efektyvusis skerspjūvis apskaičiuojamas pagal įprastas taisykles, tarus, kad įtempiai pasiskirsto tolygiai per visą skerspjūvį (10.1 pav.).

Naudojant nesimetrinius skerspjūvius efektyviojo skerspjūvio sunkio ašis persilenka ir atsiranda papildomas lenkimo momentas apie vieną arba abi skerspjūvio ašis (10.2 pav.). Tuomet šiuos elementus reikia skaičiuoti kaip gniuždomos ašinės jėgos ir lenkimo momentų veikiamus elementus (ekscentriškieji elementai).

Kolonų skaičiavimas atitinka ašinės jėgos veikiamų elementų skaičiavimą.



10.1 pav. Ašinės jėgos veikiamas elementas; bendras ir efektyvusis skerspjūvio plotai



10.2 pav. Ašinės jėgos veikiamas elementas; papildomas lenkimo momentas z ašį

Lenkimo momento ir ašinės jėgos veikiamos kolonos

Skaičiavimas atitinka lenkimo momento ir ašinės jėgos veikiamų elementų skaičiavimą.

11. SIJOS

Sijos – lenkiamieji elementai, jų skaičiavimas priklauso nuo to, ar sija yra suvaržyta, ar nesuvaržyta nuo skersinio sukamojo klupumo.

Sijos, suvaržytos nuo lenkiamojo (skersinio) sukamojo klupumo

Paprastai ant sijų dedama tam tikra perdanga, kuri tvirtinama per visą sijos ilgį. Tokiu atveju pakanka tikrinti tik sijos stiprumą (stiprumo laikomąją galią).

Sijos, nesuvaržytos nuo lenkiamojo sukamojo klupumo

Jei prie sijos visu ilgiu nėra pritvirtinta perdanga arba sija nuo skersinio sukamojo klupumo įtvirtinta tik atskiruose taškuose (pvz., antraeilių sijų prijungimo vietose), sijos laikomoji galia turi būti nustatoma tikrinant sijos stiprumą ir jos stabilumą.

12. TRAPECINIAI LAKŠTINIAI PROFILIUOČIAI

Trapeciniai lakštiniai profiliuočiai dažniausiai naudojami projektuojant stogo ir išorės sienų konstrukcijas (13 sk.).

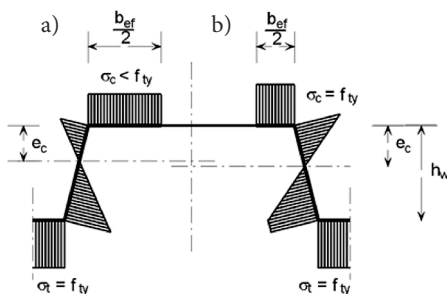
Trapecinių lakštinių profiliuočių, naudojamų stogo ir sienų konstrukcijose, skaičiuojama:

- lenkimo laikomoji galia;
- šlyties laikomoji galia;
- vietinių jėgų laikomoji galia;
- lenkimo momento ir skersinės jėgos bendro poveikio laikomoji galia;
- standumas.

LST EN 1993-1-3 normų dalį galima takyti, jei trapecinio lakštinio profiliuočio matmenys atitinka apribojimus, pateiktus šių normų 3.6 pav. Kitais atvejais būtina atlikti bandymus.

Lenkiamosios laikomosios galios tikrinimas

Lakštiniai profiliuočiai skaičiuojami kaip lenkiami elementai (žr. lenkiamųjų elementų skaičiavimo skyrių). Paprastai tariama, kad apatinėje juostoje pasiekiami takumo įtempiai, o kita skerspjūvio dalis dirba tampriai (12.1 pav., a), arba laikoma, kad takumo įtempiai pasiekiami ir apatinėje ir viršutinėje juostose (12.1 pav., b).



12.1 pav. Įtempių pasiskirstymas, kai takumo įtempiai pasiekiami tik apatinėje juostoje (a) ir kai takumo įtempiai pasiekiami apatinėje ir viršutinėje juostose (b)

Jei sienelė yra liauna (4 klasė), dalį sienelės reikia nevertinti.

Tarpinės sąstandos (12.2 pav.) sustandina skerspjūvį ir padidina skerspjūvio laikomąją galią.

Šlyties laikomoji galia

Žr. skaičiavimas nuo skersinės jėgos.

Vietinių jėgų laikomoji galia

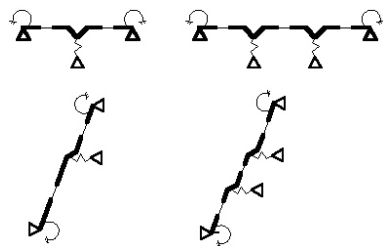
Žr. skaičiavimas vietinėms jėgoms.

Lenkimo momento ir skersinės jėgos bendro poveikio laikomoji galia

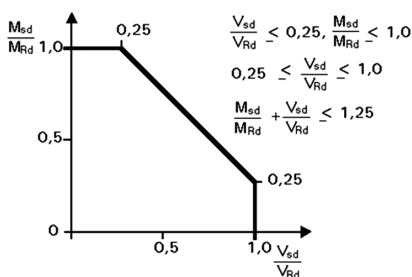
Šiuo atveju taikomos sąlygos, pateiktos 12.3 pav.

Momentų persiskirstymas

Paprastai trapeziniuose lakštiniuose profiliuotuose įrašos apskaičiuojamos esant tampriai stadijai. Tačiau leidžiama įvertinti ir įrašų persiskirstymą. Tai galima atlikti taikant plastinių lankstų metodą.



12.2 pav. Tarpinių sąstandų modeliavimas



12.3 pav. Momento ir skersinės jėgos sąveikos diagrama

13. STATINIAI IŠ PLONASIENIŲ KONSTRUKCIJŲ

Projektuojant statinius siekiama, kad jie būtų lengvi ir ekonomiški. Todėl vis plačiau naudojamos plonasienės konstrukcijos.

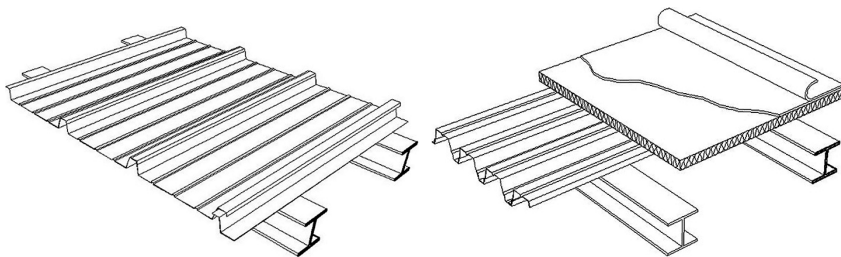
Plonasieniai elementai, tokie kaip ilginiai, rėmo elementai (kolonos, sijos), vis dažniau pakeičia tradicinius valcuotuosius elementus ir ypač valcuotuosius ilginius. Taip pat šie plonasieniai elementai dažnai pakeičia ir konstrukcijas iš kitų medžiagų, pvz., medines.

Prie plačiai naudojamų konstrukcinių elementų reikia priskirti ir profiliuotus lakštus. Jie jau buvo naudojami ir gerokai anksčiau. Tačiau dabar dėl tobulesnės jų gamybos technologijos (sudėtingesnė forma ir pan.) ir naudojimo ne tik stogams, bet ir net perdangoms, jų naudojimo sritis labai išsiplėtė.

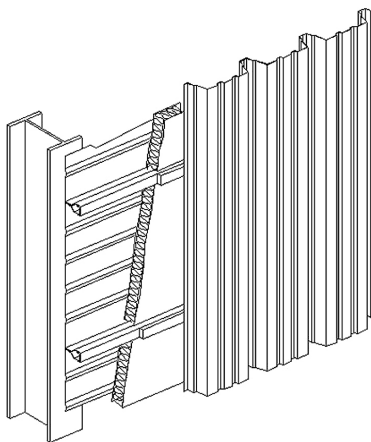
Naudojimas. Lakštiniai profiliuočiai

Lakštiniai profiliuočiai gali būti naudojami stogams. Be to, gana plačiai lakštiniai profiliuočiai naudojami vertikalųjų sienų konstrukcijoms.

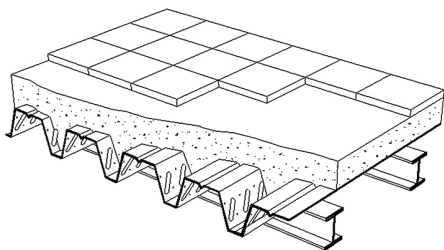
Lakštiniai profiliuočiai gali būti naudojami kompozitinėms perdangoms įrengti (13.3 pav.). Lakštinis profiliuotis naudojamas nesutvirtėjusio betono svoriui ir perdangų apkrovoms laikyti. Efektyviausias naudojimas šiose konstrukcijose yra tuo atveju, jei skaičiuojama kaip kompozitinė konstrukcija.



13.1 pav. Stogų konstrukcija naudojant vieną profiliuotą lakštą



13.2 pav. Vertikaliosios sienos konstrukcija



13.3 pav. Profiliuoto lakšto naudojimas kompozitinėje perdangoje (Projektas ESDEP Course 2008)

Naudojimas. Trisluoksnės plokštės

Trisluoksnėms plokštėms naudojami du lakštiniai profiliuočiai ir tarp jų dedama šilumos izoliacija. Jie leidžia greitai įrengti stogo ar sienų konstrukciją (1.4 pav.).

Naudojimas. Elementai

Kaip jau buvo parodyta anksčiau, elementams naudojami įvairiausios formos skerspjūviai (1.2 pav.). Labiausiai taikytini skerspjūviai yra tie, kurių jungtims nereikia papildomų elementų, pvz., sujungti du plonasienius elementus suglaudžiant sienelės.

Pramoniniai pastatai

Santvaros

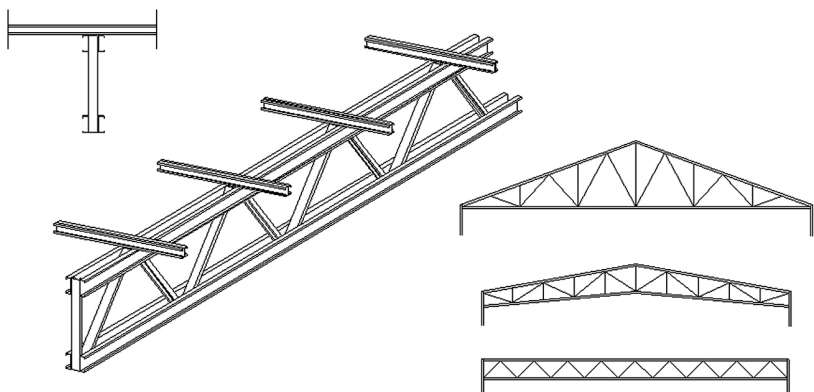
Jos paprastai projektuojamos iš lovinių profiliuočių. Juostos projektuojamos iš suporintų lovinių sienelėmis į vidaus pusę (13.4 pav.). Tinklelio strypai paprastai projektuojami iš viengubo lovinio profiliuotio. Dažniausiai naudojamas didelio stiprumo plienas. Elementai mazge jungiami dažniausiai varžtais. Tokias santvaras galima suprojektuoti iki 50 m ilgio.

Rėmai

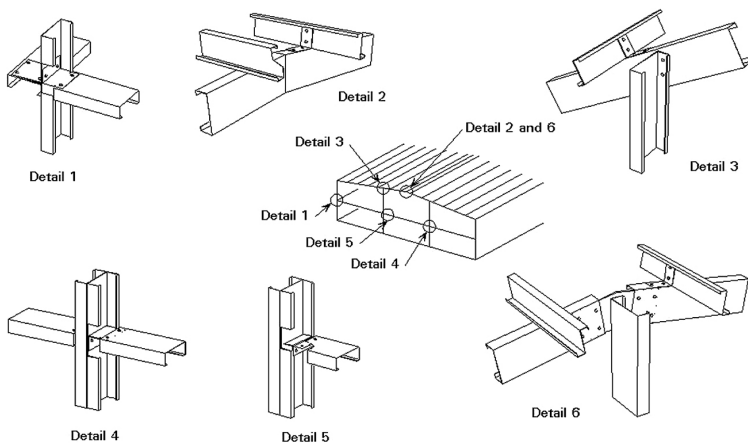
Paprastai rėmai dažniausiai projektuojami nedidelio tarpatramio (13.5 pav.). Bet dabar jau galima aptikti ir suprojektuotus gana didelio tarpatramio rėmus.

Ilginiai

Didžiausiai plonasieniai elementai naudojami ilginiams. Tarpatramis yra nuo 4 iki 15 metrų, skerspjūvio aukštis – nuo 100 iki 300 mm. Ilginių skerspjūviai ir konstrukciniai sprendimai pateikti 9 sk.



13.4 pav. Santvaros



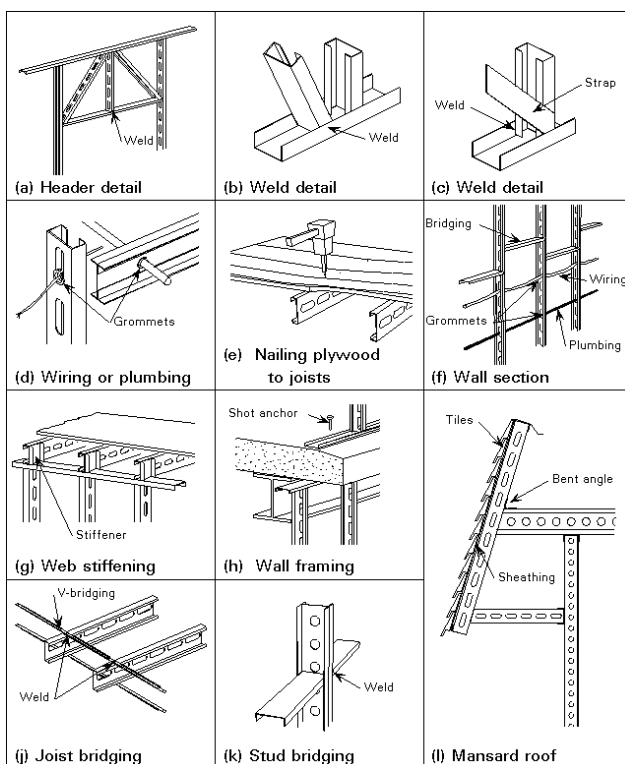
13.5 pav. Rėmų plonasieniai elementai (Projektas ESDEP Course 2008)

Gyvenamieji pastatai

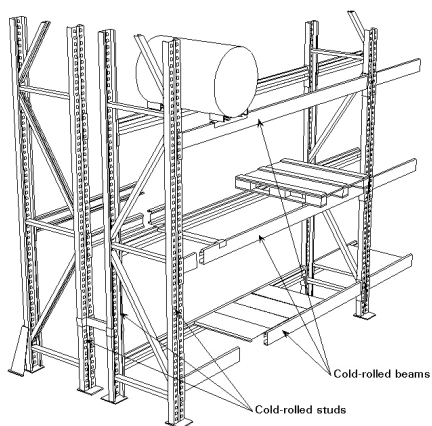
Gyvenamieji pastatai iš plonasienių elementų (13.6 pav.), kurie naudojami laikinoms konstrukcijoms, Lietuvoje beveik neprojektuojami. Jie daugiau paplitę kitose šalyse, projektuojant ekonominės klasės gyvenamuosius pastatus. Gyvenamuosiuose namuose elementai tarpusavyje jungiami varžtais.

Stelažai

Dažniausiai naudojami lankstyti profiliai su apvaliomis ir pailgomis skylėmis, kad būtų patogu elementus tarpusavyje greitai sujungti, nenaudojant jungių, ir išardyti.



13.6 pav. Plonasieniai skerspjūviai gyvenamuosiuose pastatuose (Projektas ESDEP Course 2008)



13.7 pav. Stelažai (Projektas ESDEP Course 2008)



14. PLONASIENIŲ KONSTRUKCIJŲ SKAIČIAVIMO PAVYZDŽIAI

Lankstyto lovio skaičiavimas

Pradiniai duomenys

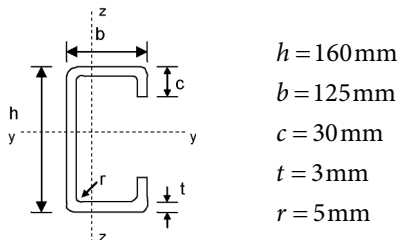
Patikrinti lanksčiai paremtos 4 m ilgio sijos iš lankstyto lovinio profilio laikomąją galią. Konstrukcija įrengta virš sijos nesuvaržo sijos pasislinkimo iš lenkimo plokštumos.

Skaičiuotinė apkrova nuo nuolatinių ir kintamųjų apkrovų į tiesinį sijos metrą – 7,2 kN/m.

Apkrova nėra pridėta skerspjūvio šlyties centre, todėl būtina įvertinti papildomą skerspjūvio sukimą. Šiame pavyzdyje tas nebus sprendžiama.

Plieno klasė – S 500 MC

Skerspjūvio matmenys



Skaičiavimas

Apkrovos

Skaičiuotinė apkrova į tiesinį sijos metrą $q = 7,2 \text{ kN/m}$.

Koeficientai

$\gamma_{M0} = 1,0$ ir $\gamma_{M1} = 1,1$ (LST EN 1993-1-3, 2 sk.).

Įrąžos

Lenkimo momentas:

$$M_{Ed} = \frac{q \times 4^2}{8} = 14,4 \text{ kNm}.$$

Skersinė jėga:

$$V_{Ed} = \frac{q \times 4}{2} = 14,4 \text{ kN.}$$

Plienai

Stipris:

$$f_{yb} = 500 \text{ MPa, } f_u = 550 \text{ MPa}$$

EN 10149 2 dalis (LST EN 1993-1-3, 3.1b lent.).

Skerspjuvis gali būti priskirtas skerspjuviams, kuriems galioja LST EN 1993-1-3, nes

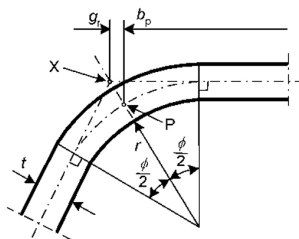
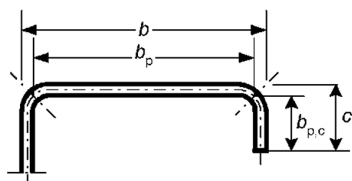
$$\frac{b}{t} = \frac{125}{3} = 41,7 \leq \frac{b}{t} = 60,$$

$$\frac{c}{t} = \frac{30}{3} = 10 \leq \frac{c}{t} = 50,$$

$$\frac{h}{t} = \frac{160}{3} = 53,3 \leq \frac{h}{t} = 500 \sin \varphi = 500 \sin 90^\circ = 500.$$

Skerspjuvio savybės

Suapvalinti kampai



LST EN 1993-1-3, 5.1 pav.

$$r_m = r + t / 2 = 5 + 3 / 2 = 6,5 \text{ mm,}$$

$$g_r = r_m \left(\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right) = 6,5 \times (\operatorname{tg} 45^\circ - \sin 45^\circ) =$$

$$6,5 \times (1,0 - 0,707) = 1,904 \text{ mm,}$$

$$b_p = b - t - 2g_r = 125 - 3 - 2 \times 1,904 = 118,2 \text{ mm.}$$

Kadangi

$$r = 5 \text{ mm} \leq 5t = 5 \times 3 = 15 \text{ mm ir}$$

$$r = 5 \text{ mm} \leq 0,10b_p = 0,10 \times 118,2 = 11,82 \text{ mm},$$

skaičiuojant skerspjūvio laikomąją galią į kampų suapvalinimą galima nekreipti dėmesio, t. y. galima skerspjūvį laikyti sudarytą iš plokščių elementų su stačiais kampais. Skaičiuojant skerspjūvio standžio charakteristikas visuomet turi būti taikoma tikroji skerspjūvio forma (LST EN 1993-1-3, 5.1 sk.).

Skerspjūvio plokščiųjų dalių pločiai

Juosta:

$$b_{p,f} = b - t - 2g_r = 125 - 3 - 2 \times 1,9 = 118,2 \text{ mm}.$$

Sielė:

$$b_{p,w} = h - t - 2g_r = 160 - 3 - 2 \times 1,9 = 153,2 \text{ mm}.$$

Užlenktoji dalis:

$$b_{p,c} = c - t / 2 - g_r = 30 - 3 / 2 - 1,9 = 26,6 \text{ mm}.$$

Bendrojo skerspjūvio stačiaisiais kampais charakteristikos

Plotas:

$$A_{g,sh} = h \times t + 2 \times c \times t + 2(b - 2 \times t) \times t = 160 \times 3 + 2 \times 30 \times 3 + 2(125 - 2 \times 3) \times 3 = 1374 \text{ mm}^2.$$

Inercijos momentas apie y-y ašį:

$$\begin{aligned} I_{yg,sh} &= \frac{t \times h^3}{12} + 2 \left(\frac{t \times c^3}{12} + t \times c \left(\frac{h}{2} - \frac{c}{2} \right)^2 \right) + \\ &2 \left(\frac{(b - 2 \times t) \times t^3}{12} + (b - 2 \times t) \times t \times \left(\frac{h}{2} - \frac{t}{2} \right)^2 \right) = \\ &\frac{3 \times 160^3}{12} + 2 \left(\frac{3 \times 30^3}{12} + 3 \times 30 \left(\frac{160}{2} - \frac{30}{2} \right)^2 \right) + \\ &2 \left(\frac{(125 - 2 \times 3) \times 3^3}{12} + (125 - 2 \times 3) \times 3 \times \left(\frac{160}{2} - \frac{3}{2} \right)^2 \right) = 6,198 \times 10^6 \text{ mm}^4. \end{aligned}$$

Bendrojo skerspjūvio charakteristikos įvertinant suapvalinimus

(LST EN 1993-1-3, 5.1 form.)

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\Phi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^4 r_j \frac{\Phi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^5 b_{p,i}} =$$

$$0,43 \frac{4 \left(5 \frac{90^\circ}{90^\circ} \right)}{153,2 + 2 \times 118,2 + 2 \times 26,6} = 0,43 \times \frac{20,0}{442,8} = 0,019,$$

čia $n = 4$ – alkūninių elementų skaičius; $m = 5$ – plokščiųjų elementų skaičius.

Plotas:

$$A_g = A_{g,sh} (1 - \delta) = 1374 (1 - 0,019) = 1347 \text{ mm}^2.$$

Inercijos momentas apie y - y ašį:

$$I_{yg} = I_{yg,sh} (1 - 2\delta) = 6,198 \times 10^6 (1 - 2 \times 0,019) = 5,958 \times 10^6 \text{ mm}^4.$$

Atsparumo momentas apie y - y ašį:

$$W_{yg} = \frac{I_{yg}}{\frac{h}{2}} = \frac{5,958 \times 10^6}{\frac{160}{2}} = 7,447 \times 10^4 \text{ mm}^3.$$

Skerspjuvio klasė (LST EN 1993-1-1, 5.2 lent.)

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{500}} = 0,686.$$

Gniuždomoji juosta:

$$c = b - 2 \frac{t}{2} - 2g_r = 125 - 3 - 2 \times 1,9 = 118,2 \text{ mm},$$

$$\frac{c}{t} = \frac{118,2}{3} = 39,4 > 42\varepsilon = 42 \times 0,686 = 28,8,$$

4 klasė

Sienelė (gniuždomoji dalis nuo lenkimo):

$$c = h - 2 \frac{t}{2} - 2g_r = 160 - 3 - 2 \times 1,9 = 153,2 \text{ mm},$$

$$72\varepsilon = 72 \times 0,686 = 49,4 < \frac{c}{t} = \frac{153,2}{3} = 51,1 > 83\varepsilon = 83 \times 0,686 = 56,9,$$

2 klasė

Užlenktoji dalis:

$$c = c - \frac{t}{2} - g_r = 30 - 1,5 - 1,9 = 26,6 \text{ mm},$$

(čia c sutapo žymėjimas, bet ne fizinė prasmė),

$$10\varepsilon = 10 \times 0,686 = 6,86 < \frac{c}{t} = \frac{26,6}{3} = 8,87 > 14\varepsilon = 14 \times 0,686 = 9,6,$$

3 klasė

Gniuždomos juostos efektyvusis plotis (LST EN 1993-1-5, 4.1, 4.2 lent.)

Vartoti b_p vietoje $\bar{b}$ (LST EN 1993-1-3, 5.5.2 (1) p.).

Gniuždomos juostos efektyvus plotis:

$$\bar{b} = b_{p,f} = 118,2 \text{ mm.}$$

Įtempiai per juostos plokščiąją dalį pasiskirsto tolygiai, todėl

$$\psi = \sigma_1 / \sigma_2 = 1.$$

Tuomet

$$k_\sigma = 4.$$

Sąlyginis gniuždomosios juostos liaunis ir efektyvusis plotis LST EN 1993-1-5, 4.4 sk.:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b} / t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{118,2 / 3}{28,4 \times 0,686 \sqrt{4}} = 1,012,$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,012 - 0,055(3 + 1)}{1,012^2} = 0,773,$$

visada $\rho \leq 1,0$,

$$b_{eff} = \rho \bar{b} = 0,773 \times 118,2 = 91,42 \text{ mm,}$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 b_{eff} = 0,5 \times 91,42 = 45,71 \text{ mm.}$$

Efektinio skerspjūvio charakteristikos nevertinant suapvalinimų

$$A_{eff,sh} = h \times t + 2 \times c \times t + (b - 2 \times t - 26,78) \times t + (b - 2 \times t) \times t = \\ 160 \times 3 + 2 \times 30 \times 3 + (125 - 2 \times 3 - 26,78) \times 3 + (125 - 2 \times 3) \times 3 = 1294 \text{ mm}^2;$$

čia $118,2 - 91,42 = 26,78$ – neefektyvus juostos plotis.

Statinis momentas skerspjūvio apatinio krašto atžvilgiu:

$$S_{y,eff,sh} = t \times h \times \frac{h}{2} + c \times t \times \frac{c}{2} + c \times t \times \left(h - \frac{c}{2} \right) + \\ (b - 2 \times t) \times t \times \frac{t}{2} + (b - 2 \times t - 26,78) \times t \times \left(h - \frac{t}{2} \right) = \\ 160 \times 3 \times \frac{160}{2} + 30 \times 3 \times \frac{30}{2} + 30 \times 3 \times \left(160 - \frac{30}{2} \right) + \\ (125 - 2 \times 3) \times 3 \times \frac{3}{2} + (125 - 2 \times 3 - 26,78) \times 3 \times \left(160 - \frac{3}{2} \right) = 97\,190 \text{ mm}^3.$$

Atstumas nuo efektyviojo skerspjūvio sunkio centro iki skerspjūvio kraštų:

$$z_{eff,apat} = \frac{S_{y,eff,sh}}{A_{eff,sh}} = \frac{97190}{1294} = 75,126 \text{ mm},$$

$$z_{eff,virs} = h - z_{eff,apat} = 160 - 75,126 = 88,874 \text{ mm}.$$

Atstumas tarp bendrojo ir efektyviojo skerspjūvio sunkio ašių:

$$z_{g,eff} = \frac{h}{2} - z_{eff,apat} = \frac{160}{2} - 75,126 = 4,874 \text{ mm}.$$

Efektyviojo skerspjūvio inercijos momentas apie y-y ašį:

$$\begin{aligned} I_{y,eff,sh} &= \frac{t \times h^3}{12} + t \times h \times z_{g,eff}^2 + 2 \frac{t \times c^3}{12} + t \times c \left(\frac{h}{2} - \frac{c}{2} + z_{g,eff} \right)^2 + \\ &+ t \times c \left(\frac{h}{2} - \frac{c}{2} - z_{g,eff} \right)^2 + \frac{(b-2 \times t) \times t^3}{12} + \frac{(b-2 \times t-26,78) \times t^3}{12} + \\ &+ (b-2 \times t-26,78) \times t \times \left(\frac{h}{2} - \frac{t}{2} + z_{g,eff} \right)^2 + (b-2 \times t) \times t \times \left(\frac{h}{2} - \frac{t}{2} - z_{g,eff} \right)^2 = \\ &= \frac{3 \times 160^3}{12} + 3 \times 160 \times 4,874^2 + 2 \frac{3 \times 30^3}{12} + 3 \times 30 \left(\frac{160}{2} - \frac{30}{2} + 4,874 \right)^2 + \\ &+ 3 \times 30 \left(\frac{160}{2} - \frac{30}{2} - 4,874 \right)^2 + \frac{(125-2 \times 3) \times 3^3}{12} + \frac{(125-2 \times 3-26,78) \times 3^3}{12} + \\ &+ (125-2 \times 3-26,78) \times 3 \times \left(\frac{160}{2} - \frac{3}{2} + 4,874 \right)^2 + \\ &+ (125-2 \times 3) \times 3 \times \left(\frac{160}{2} - \frac{3}{2} - 4,874 \right)^2 = 5,673 \times 10^6 \text{ mm}^4. \end{aligned}$$

Efektyviojo skerspjūvio charakteristikos įvertinant suapvalinimus

$$\begin{aligned} \delta &= 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^4 r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^5 b_{p,i}} = \\ &= 0,43 \frac{4 \left(5 \frac{90^\circ}{90^\circ} \right)}{153,2 + 118,2 + (118,2 - 26,78) + 2 \times 26,6} = 0,43 \frac{20,0}{416,09} = 0,021. \end{aligned}$$

Plotas:

$$A_{eff} = A_{eff,sh} (1 - \delta) = 1294 \times (1 - 0,021) = 1267 \text{ mm}^2.$$

Inercijos momentas apie y - y ašį:

$$I_{y,eff} = I_{y,eff,sh} (1 - 2\delta) = 5,673 \times 10^6 \times (1 - 2 \times 0,021) = 5,438 \times 10^6 \text{ mm}^4.$$

Atsparumo momentai:

$$W_{y,eff,min} = \frac{I_{y,eff}}{z_{eff,virs}} = \frac{5,438 \times 10^6}{88,874} = 6,407 \times 10^4 \text{ mm}^3,$$

$$W_{y,eff,max} = \frac{I_{y,eff}}{z_{eff,apat}} = \frac{5,438 \times 10^6}{75,126} = 7,239 \times 10^4 \text{ mm}^3.$$

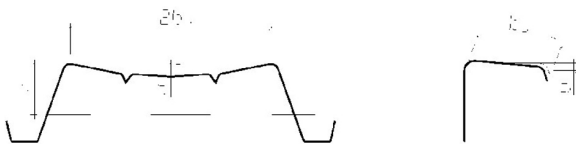
Atsiknoјimas dėl šlyties (LST EN 1993-1-5, 3.1 p.)

$$b_0 = (b - t) / 2 = (125 - 3) / 2 = 61 \text{ mm},$$

$$\frac{L_e}{50} = \frac{4000}{50} = 80,$$

$$b_0 = 61 < \frac{L_e}{50} = 80, \text{ atsiknoјimo dėl šlyties galima nepaisyti.}$$

Juostos įsivyris (LST EN 1993-1-3, 5.4 p.)



5.3 paveikslas. Juostos įsivyris

LST EN 1993-1-5, 5.3 pav.

Tiesaus neapkrauto profiliuotojo įsivyris:

$$u = 2 \frac{\sigma_a^2 b_s^4}{E^2 t^2 z} = 2 \frac{190,2^2}{210000^2} \frac{59,1^4}{3^2 \times 78,5} = 0,028 \text{ mm},$$

$$b_s = b_{p,f} / 2 = 118,2 / 2 = 59,1 \text{ mm}.$$

Nagrinėjamos juostos atstumas nuo neutraliosios ašies:

$$z = \frac{h}{2} - \frac{t}{2} = 80 - 1,5 = 78,5 \text{ mm}.$$

Juostų vidutiniai įtempiai, apskaičiuoti taikant bendrąjį skerspjūvio plo-

tą:

$$\sigma_a = \frac{M_{Ed} z}{I_{yg}} = \frac{14,4 \times 10^3 \times 10^3 \times 78,5}{5,958 \times 10^6} = 190,2 \text{ N/mm}^2.$$

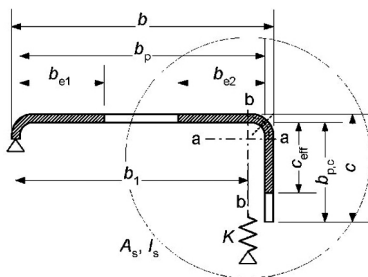
Kadangi

$$u = 0,028 \text{ mm} < 5\%h = 0,05 \times 160 = 8 \text{ mm},$$

į juostos įsvirį galima neatsižvelgti.

Kraštinės sąstandos skaičiavimas

Iškreipiamasis klumpumas (LST EN 1993-1-3, 5.5.3 p.)



$$b/t \leq 60$$

a) vienkraštė klostė

LST EN 1993-1-3, 5.7 pav.

1 žingsnis. Pradinis skerspjūvis. Apskaičiuoti pradinį efektyvųjį sąstandos skerspjūvio plotą, taikant efektyviuosius pločius, nustatytus tarus, kad sąstanda suteikia visiškąjį įtvirtį.

Juosta (4 klasė):

$$b = 125 \text{ mm},$$

$$b_{p,f} = 118,2 \text{ mm},$$

$$b_{eff} = 91,42 \text{ mm},$$

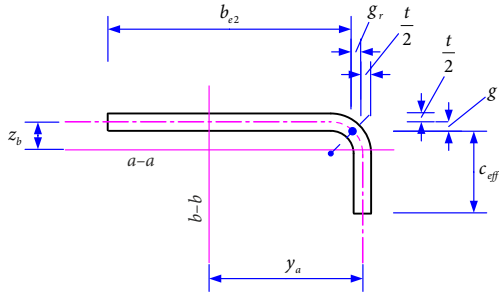
$$b_{e1} = b_{e2} = 45,71 \text{ mm}.$$

Užlenktoji dalis (3 klasė):

$$b_{p,c} = 26,6 \text{ mm},$$

$$c_{eff} = b_{p,c}.$$

Sąstandos skerspjūvio charakteristikos neįvertinant suapvalinimų



Efektyvūs kraštinės sąstandos skerspjūvis

Plotas:

$$A_{s,sh} = t \left(b_{e2} + g_r - \frac{t}{2} + c \right) = 3 \times (45,71 + 1,904 - 1,5 + 30) = 228,3 \text{ mm}^2.$$

Statinis momentas apie juostos ir užlenktosios dalies vidurinę liniją:

$$S_{y,sh,vidl} = t \times c \times \left(\frac{c}{2} + g_r \right) = 3 \times 30 \times \left(\frac{30}{2} + 1,904 \right) = 1215 \text{ mm}^3,$$

$$S_{z,sh,vidl} = t \times \left(b_{e2} + g_r - \frac{t}{2} \right) \frac{(b_{e2} + g_r)}{2} = 3 \times (45,71 + 1,904 - 1,5) \times \left(\frac{45,71 + 1,904}{2} \right) = 3293 \text{ mm}^3.$$

Sunkio centro padėtis:

$$z_b = \frac{S_{y,sh,vidl}}{A_{s,sh}} = \frac{1215}{228,3} = 5,321 \text{ mm},$$

$$y_a = \frac{S_{z,sh,vidl}}{A_{s,sh}} = \frac{3293}{228,3} = 14,423 \text{ mm}.$$

Inercijos momentas apie horizontaliąją ašį:

$$I_{ys,sh} = \frac{\left(b_{e2} + g_r - \frac{t}{2} \right) \times t^3}{12} + \left(b_{e2} + g_r - \frac{t}{2} \right) \times t \times z_b^2 + \frac{c^3 \times t}{12} + c \times t \times \left(\frac{c}{2} - z_b - \frac{t}{2} \right)^2 = \frac{(45,71 + 1,904 - 1,5) \times 3^3}{12} + (45,71 + 1,904 - 1,5) \times 3 \times 5,32^2 +$$

$$\frac{30^3 \times 3}{12} + 30 \times 3 \times \left(\frac{30}{2} - 5,321 - 1,5 \right)^2 = 16\,790 \text{ mm}^4.$$

Sąstandos skerspjūvio charakteristikos įvertinant suapvalinimus

$$\delta = 0,43 \frac{r}{(b_{e2} + b_{p,c})} = 0,43 \frac{5}{45,71 + 26,6} = 0,03.$$

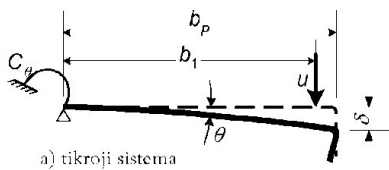
Plotas:

$$A_s = A_{s,sh} (1 - \delta) = 228,3 \times (1 - 0,03) = 221,55 \text{ mm}^2.$$

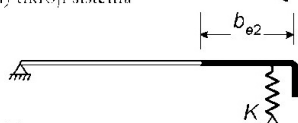
Inercijos momentas apie horizontaliąją ašį:

$$I_{ys} = I_{ys,sh} (1 - 2\delta) = 16\,790 \times (1 - 2 \times 0,03) = 15\,790 \text{ mm}^4.$$

2 žingsnis. Remiantis efektyviojo sąstandos skerspjūvio charakteristikomis, nustatyti iškreipiamąjį klupumą (sąstandos lenkiamojo klupumo) koeficientą, atsižvelgiant į ištiesinio spyruoklinio įtvirčio poveikius.



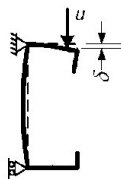
a) tikroji sistema



b) lygiavertė sistema



Gniuždymas



Lenkimas

LST EN 1993-1-3, 5.6 pav.

Vienetinio ilgio spyruoklinis standis

Atstumas nuo sienelės vidurinės linijos iki kraštinės sąstandos skerspjūvio ploto sunkio centro:

$$b_1 = b - y_a - t / 2 = 125 - 14,423 - 3 / 2 = 109,08 \text{ mm}.$$

Jei skerspjūvio antroji (apatinė) juosta tempiama (LST EN 1993-1-3, 5.5.3.1 p.), $k_f = 0$.

Skerspjūvio sienelės aukštis:

$$h_w = h - 2 \frac{t}{2} = 160 - 2 \times 1,5 = 157 \text{ mm}.$$

Sąstandos standis:

$$K_1 = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)} \frac{1}{b_1^2 h_w + b_1^3 + 0,5 b_1 b_2 h_w k_f} =$$

$$\frac{210000 \times 3^3}{4(1-0,3^2)} \frac{1}{109,08^2 \times 157 + 109,08^3 + 0} = 0,492 \text{ N/mm}^2.$$

Tamprieji kritiniai kraštinės sąstandos įtempiai:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \sqrt{K_1 E I_{ys}}}{A_s} = \frac{2 \sqrt{0,492 \times 210000 \times 15790}}{221,55} = 364,7 \text{ N/mm}^2.$$

Iškreipiamojo sąstandos klupumo koeficiento nustatymas

Sąlyginis liaunis:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb} / \sigma_{cr,s}} = \sqrt{500 / 364,7} = 1,171.$$

Kai $0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38$; klupumo koeficientas apskaičiuojamas taip:

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_d = 1,47 - 0,723 \times 1,171 = 0,623.$$

Sumažintasis efektyvusis sąstandos skerspjūvio plotas

Sumažintas (redukuotas) skerspjūvio plotas:

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} = 0,623 \times 221,55 \frac{500 / 1,0}{220,8} = 312,8 \text{ mm}^2,$$

čia gniuždomieji įtempiai ties sąstandos vidurio linija, apskaičiuoti taikant efektyvųjį skerspjūvį:

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{M_{Ed} \times \left(z_{eff,virs} - \frac{t}{2} \right)}{I_{y,eff}} = \frac{14,4 \times 10^3 \times 10^3 \times \left(88,874 - \frac{3}{2} \right)}{5,438 \times 10^6} = 220,8 \text{ N/mm}^2.$$

Kadangi $A_{s,red} > A_s$, $A_{s,red} = A_s = 221,55 \text{ mm}^2$, sąstandos storio mažinti nereikia.

Skerspjuvio laikomoji galia

Skerspjuvio lenkiamoji laikomoji galia:

$$M_{Rd} = W_{y,eff,min} \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = 6,407 \times 10^4 \times 10^{-9} \frac{500 \times 10^3}{1,0} = 32,04 \text{ kNm} .$$

Kadangi $M_{Ed} = 14,4 \text{ kNm} < M_{Rd} = 32,04 \text{ kNm}$, lenkiamoji laikomoji galia pakankama.

Skerspjuvio šlyjamoji laikomoji galia:

$$V_{Rd} = h_w t \frac{f_{vb}}{\gamma_{M0}} = 157 \times 3 \times \frac{271,6 \times 10^3}{1,0} = 128,0 \text{ kN} .$$

Šlyjamasis klumpamasis stipris nustatomas pagal LST EN 1993-1-3, 6.1 lent.

6.1 lentelė. Šlyjamasis klumpamasis stipris f_{bv}

Sąlyginis sienelės liaunis	Sienelė nesustandinta prie atramos	Sienelė sustandinta prie atramos ¹⁾
$\bar{\lambda}_w \leq 0,83$	$0,58 f_{yh}$	$0,58 f_{yt}$
$0,83 < \bar{\lambda}_w < 1,40$	$0,48 f_{ys} \bar{\lambda}_w$	$0,48 f_{ys} / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,40$	$0,67 f_{yb} / \bar{\lambda}_w^2$	$0,48 f_{ys} / \bar{\lambda}_w$

¹⁾ Sustandinta ties atrama, pvz., saulėapornis. Įrengtonis sienelės iškreipai išvengti ir suprojektuotomis atraminėmis reakcijai atlaikyti.

LST EN 1993-1-3, 6.1 lent.

Sąlyginis sienelės liaunis:

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{h_w}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} = 0,346 \frac{157}{3} \sqrt{\frac{500}{210000}} = 0,884 .$$

Šlyjamasis klumpamasis stipris:

$$f_{bv} = \frac{0,48 f_{yb}}{\bar{\lambda}_w} = \frac{0,48 \times 500}{0,884} = 271,6 \text{ MPa} .$$

Kadangi $V_{Ed} = 14,4 \text{ kN} < V_{Rd} = 128,0 \text{ kN}$, šlyjamoji laikomoji galia pakankama.

Kartu veikiantis lenkimo momentas ir skersinė jėga

Pagal LST EN 1993-1-3, 6.1.10 (1) p. pataisa dėl skersinės jėgos netaikoma, jei $V_{Ed} = 14,4 \text{ kN} \leq 0,5 V_{Rd} = 0,5 \times 128,0 = 64,0 \text{ kN}$.

Klumpamoji galia

Skersinis sukamasis klumpumas

6.2.4 (1) LST EN 1993-1-3 teigia, kad skaičiuotinė lenkiamoji klumpamoji galia turi būti nustatyta pagal EN 1993-1-1 6.3.2.2 poskyrį remiantis skersinio klumpumo kreive b .

Tampriojo kritinio skersinio sukamojo klumpumo momento apskaičiavimo formulės pateikiamas literatūroje, pvz., Projektas ESDEP Course 2008:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left[\left(\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - (C_2 z_g) \right],$$

čia $k_z = 1$ – gniuždoma juosta, nesuvaržyta nuo pasisukimo apie laisvąją skerspjuvio ašį; $k_w = 1$ – skerspjuvis elemento gale nėra suvaržytas nuo persikreipimo; $z_g = \frac{h}{2}$; $C_1 = 1,12$, $C_2 = 0,454$ – koeficientai, priklausantys nuo lenkimo momento diagramos pobūdžio; $L = 4$ m – elemento ilgis tarp taškų, įtvirtintų nuo šoninio pasislinkimo; bendrojo skerspjuvio charakteristikos:

$I_z = I_{zg} = 2,85 \times 10^6 \text{ mm}^4$ – inercijos momentas apie z - z ašį;

$I_t = I_{tg} = 3,962 \times 10^3 \text{ mm}^4$ – sukimo inercijos momentas;

$I_w = I_{wg} = 1,741 \times 10^{10} \text{ mm}^4$ – iškreipos konstanta.

Apskaičiavę gauname, kad $M_{cr} = 22,78 \text{ kNm}$.

Sijos skaičiuotinė lenkiamoji klumpumo galia:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{yg} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} =$$

$$0,437 \times 0,07447 \times 10^6 \times 10^{-9} \frac{500 \times 10^3}{1,0} = 16,29 \text{ kNm}.$$

Skersinio sukamojo klumpumo koeficientas:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{1,501 + \sqrt{1,501^2 - 1,279^2}} = 0,437,$$

bet $\chi_{LT} \leq 1,0$.

čia

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] =$$

$$0,5 \left[1 + 0,34 (1,279 - 0,2) + 1,279^2 \right] = 1,501;$$

$\alpha_{LT} = 0,34$ – šaltai lankstytiems profilių nuokrypos koeficientas (b kreivė).

Sąlyginis liaunis:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y_g} f_{yb}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,07447 \times 10^6 \times 10^{-9} \times 500 \times 10^3}{22,78}} = 1,279.$$

Kadangi $M_{Ed} = 14,4 \text{ kNm} < M_{b,Rd} = 16,29 \text{ kNm}$, skersinio sukamojo klumpumo laikomoji galia pakankama.

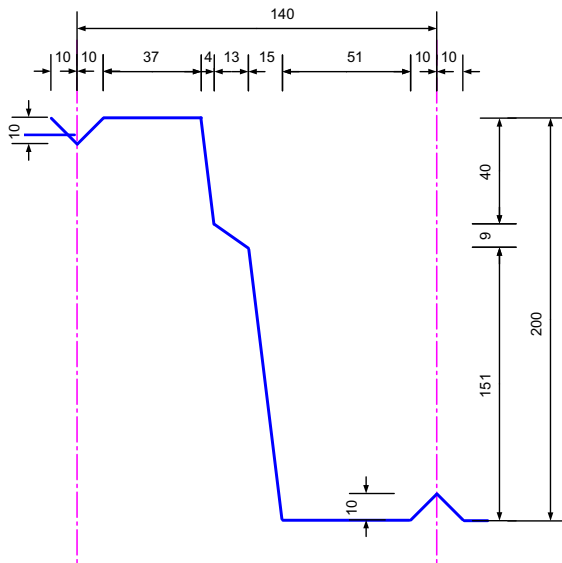
Išvada. Sijos laikomoji galia (lenkiamoji, šlyjamoji, klumpamoji) pakankama.

Lenkiamo trapecinio lakštinio profiliuočio skaičiavimas

Pradiniai duomenys

Apskaičiuoti trapecinio lakštinio profiliuočio lenkiamąją galią.

Profiluočio skerspjūvis parodytas paveiksle, o kiti duomenys pateikti toliau.



Profiluočio skerspjūvis

$$h = 200 \text{ mm},$$

$$b = 37 \text{ mm},$$

$$t = 0,7 \text{ mm},$$

$$r = 3 \text{ mm (paveiksle suapvalinimo spindulys neparodytas)}.$$

Plienas S320GD+Z

$$E = 210\,000 \text{ MPa}$$

$$f_y = f_{yb} = 320 \text{ MPa}, \quad f_u = 550 \text{ MPa},$$

$$\gamma_{M0} = 1,0.$$

Skaičiavimas

Tikriname, ar skaičiuojant skerspjūvio charakteristikas galime nekreipti dėmesio į suapvalinimus

$$\frac{r}{t} = \frac{3}{0,7} = 4,2 < 5,$$

$$\frac{r}{b_p} = \frac{3}{37} = 0,081 < 0,1,$$

tai pagal LST EN 1993-1-3, 5.1 p. galima nekreipti dėmesio į suapvalinimų įtaką.

Viršutinės skerspjūvio juostos dalių pastovumo tikrinimas

Viršutinė juosta (LST EN 1993-1-5, 4.4 p., 4.1 lentelė)

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1,0, \text{ kadangi per juostos plotį įtempiai vienodi,}$$

$$k_{\sigma} = 4,0,$$

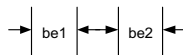
$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{320}} = 0,857,$$

$$\bar{b} = b_p = 37 \text{ mm}, \text{ čia } \bar{b} - \text{juostos plotis tarp sąstandų,}$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b}}{t \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{37}{0,7 \sqrt{28,4 \varepsilon \sqrt{k_{\sigma}}}} = 1,086,$$

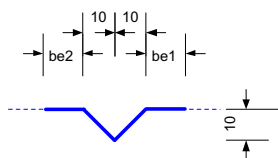
$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,086 - 0,055(3 + 1,0)}{1,086^2} = 0,734 \leq 1,0,$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \times 0,734 \times 37 = 13,585 \text{ mm}.$$

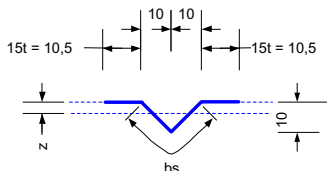


Juostos efektyviojo skerspjūvio dalis

Viršutinės juostos tarpinė sąstanda (LST EN 1993-1-3, 5.5.3.4.2 p., 5.11 pav.)



Tarpinės sąstandos matmenys plotui skaičiuoti



Tarpinės sąstandos matmenys inercijos momentui skaičiuoti

Plotas:

$$A_s = 2t \left(13,585 + \frac{10}{\cos 45} \right) = 38,82 \text{ mm}^2.$$

Inercijos momento skaičiavimas

Statinis momentas apie viršutinės juostos vidurinę liniją ir sunkio centro padėtis:

$$S_0 = 2 \times 0,7 \times \frac{10}{0,707} \times 5 = 99,0 \text{ mm}^3,$$

$$A_{si} = 2t \left(15 \times 0,7 + \frac{10}{\cos 45} \right) = 34,5 \text{ mm}^2,$$

$$z = \frac{S_0}{A_{si}} = \frac{99,0}{34,5} = 2,87 \text{ mm}.$$

Inercijos momentas apie sąstandos sunkio centrą:

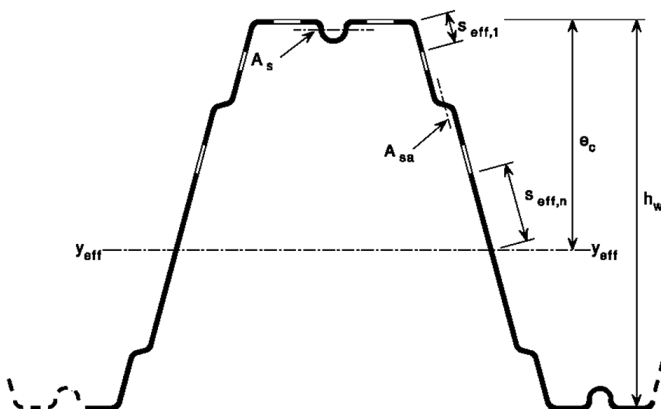
$$I_s = 2 \left(\frac{10,5 \times 0,7^3}{12} + 10,5 \times 0,7 \times \left(2,87 - \frac{0,7}{2} \right)^2 \right) + 2 \left(0,7 \times \frac{10}{0,707} \times \frac{10^2}{12} + 0,7 \times \frac{10}{0,707} \left(5 - 2,87 \right)^2 \right) = 328,17 \text{ mm}^4.$$

Juostos sąstandos kritiniai įtempiai (LST EN 1993-1-3, 5.5.3.4.2(2) form.):

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{4b_p^2(2b_p + 3b_s)}} =$$

$$\frac{4,2 \times 1,0 \times 210000}{38,82} \sqrt{\frac{328,17 \times 0,7^3}{4 \times 37^2 \left(2 \times 37 + 3 \frac{10}{0,707} \right)}} = 258,47 \text{ MPa},$$

čia $k_w = 1,0$ (imta į atsargos pusę)



LST EN 1993-1-3, 5.14 pav.

Kadangi juostoje ir sienelėje yra sąstandos, tolimesniems sąstandos skaičiavimams reikia taikyti patikslintus kritinius įtempius (LST EN 1993-1-3, 5.5.3.4.4 p.).

Kritinių įtempių skaičiavimas pateiktas prie sienelės sąstandos skaičiavimo ir gauta, kad

$$\sigma_{cr,mod} = 192,17 \text{ MPa}.$$

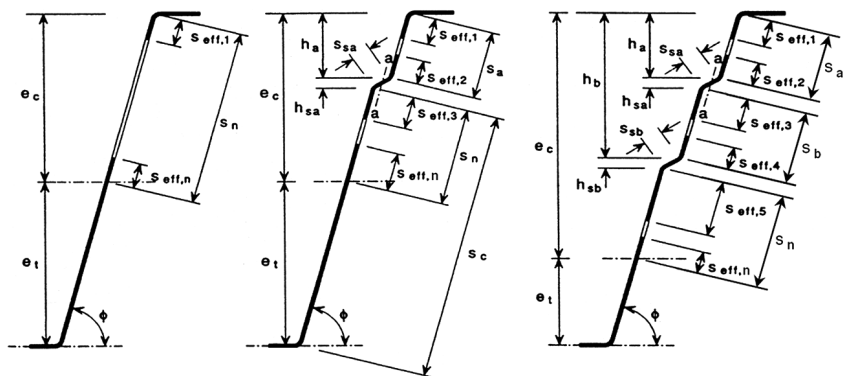
Redukuotas juostos sąstandos plotas:

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,s}} = \chi_d A_s \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{cr,mod}} = 0,537 \times 38,82 \frac{320 / 1,0}{192,17} = 34,72 \text{ mm}^2.$$

Kadangi $A_{s,red} = 34,72 \text{ mm}^2 < A_s = 38,82 \text{ mm}^2$, reikia mažinti sąstandos storį:

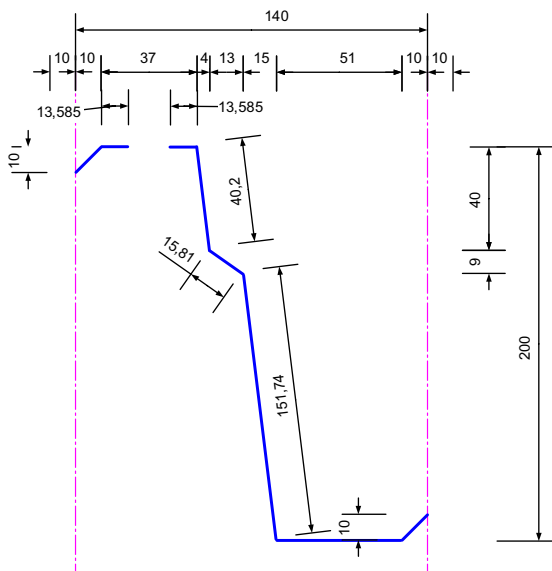
$$t_{red,s} = t \frac{A_{s,red}}{A_s} = 0,7 \frac{34,72}{38,02} = 0,626 \text{ mm}.$$

Sienelės skaičiavimas



LST EN 1993-1-3, 5.12 pav.

Skerspjūvio sunkio centro skaičiavimas, tarus, kad visa sienelė yra efektyvi



Skerspjūvio matmenys tarus, kad visa sienelė efektyvi

Plotas:

$$A = t \left(\frac{10}{0,707} + 2 \times 13,585 + 40,2 + 15,811 + 151,743 + 51 + \frac{10}{0,707} \right) = 219,95 \text{ mm}^2.$$

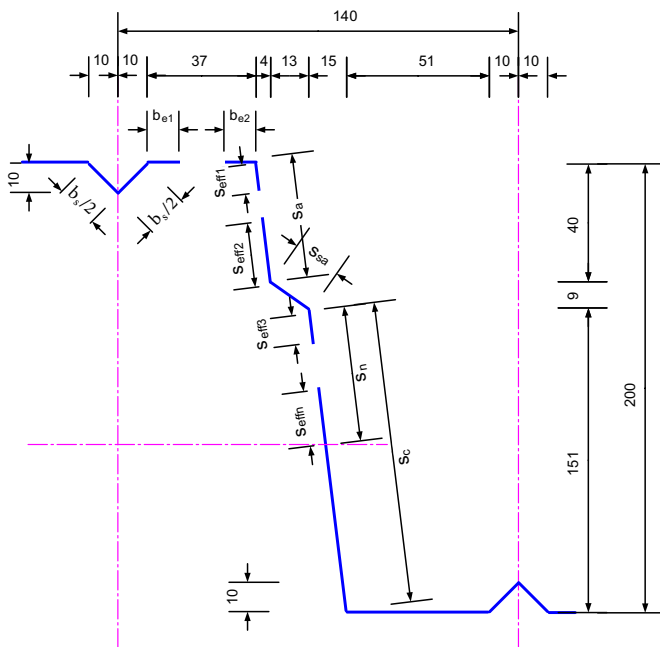
Statinis momentas viršutinės juostos vidurinės linijos atžvilgiu:

$$S = t \left(\frac{10}{0,707} 5 + 40,2 \times 20 + 15,81 \times (40 + 4,5) + 151,74 \times \left(40 + 9 + \frac{151}{2} \right) + 51 \times (40 + 9 + 151) + \frac{10}{0,707} (40 + 9 + 151 - 5) \right) = 23\,400 \text{ mm}^3.$$

Sunkio centro padėtis viršutinės juostos vidurinės linijos atžvilgiu:

$$e_c = \frac{S}{A} = \frac{23400}{219,95} = 106,39 \text{ mm}.$$

Sienelės pastovumo tikrinimas



Skerspjūvio su klupiąja sienele matmenys

Sienelės matmenys, reikalingi jos klupumui skaičiuoti:

$$\sigma_{com,Ed} = f_{yd},$$

$$S_{eff,0} = 0,76t \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0} \sigma_{com,Ed}}} = 0,76 \times 0,7 \sqrt{\frac{210\,0000}{1,0 \times 320}} = 13,628 \text{ mm},$$

$$S_{eff,1} = S_{eff,0} = 13,628 \text{ mm},$$

$$S_{eff,2} = \left(1 + \frac{0,5h_a}{e_c}\right) S_{eff,0} = \left(1 + \frac{0,5 \times 40}{106,39}\right) \times 13,628 = 16,19 \text{ mm},$$

$$S_{eff,3} = \left(1 + \frac{0,5(h_a + h_{sa})}{e_c}\right) S_{eff,0} = \left(1 + \frac{0,5(40 + 9)}{106,39}\right) \times 13,628 = 16,767 \text{ mm},$$

$$S_{eff,n} = 1,5 S_{eff,0} = 1,5 \times 13,628 = 20,443 \text{ mm}.$$

Pagal LST EN 1993-1-3, 5.5.3.4.3 p. reikia patikrinti, ar sienelė yra klupi, tam:

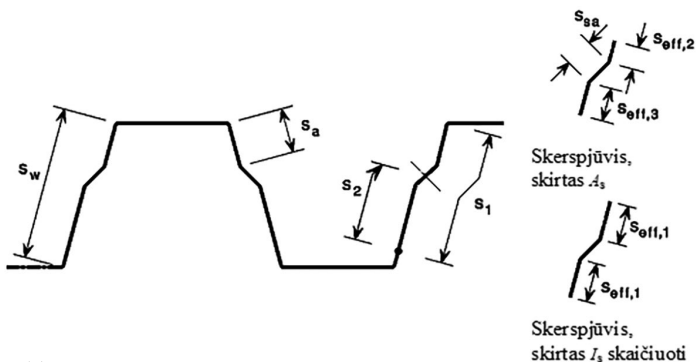
$$S_{eff,1} + S_{eff,2} = 13,628 + 16,19 = 29,818 \text{ mm} < S_a = 40,2 \text{ mm},$$

$$S_{eff,3} + S_{eff,n} = 16,767 + 20,443 = 38,21 \text{ mm} < S_n =$$

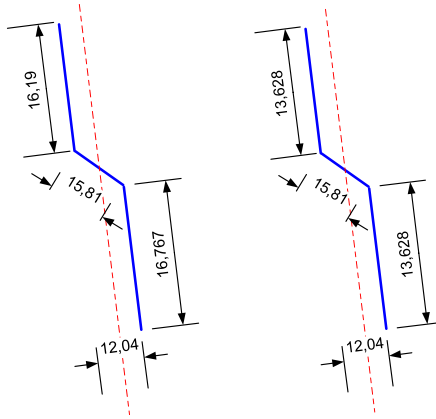
$$\frac{e_c - h_a - h_{sa}}{\sin \phi} = \frac{106,39 - 40 - 9}{0,995} = 57,674 \text{ m}.$$

Sienelė yra klupi ir perskaičiuoti nereikia.

Sienelės sąstandos skaičiavimas



LST EN 1993-1-3, 5.13 pav.



Sienelės sąstandos matmenys plotui ir inercijos momentui skaičiuoti

Plotas ir inercijos momentas:

$$A_{sa} = 0,7(16,19 + 15,81 + 16,767) = 34,14 \text{ mm}^2,$$

$$I_s = 0,7 \left(15,81 \frac{13,05^2}{12} + 2 \times 13,628 \left(\frac{13,05}{2} \right)^2 \right) = 794,04 \text{ mm}^4.$$

Kai yra viena sąstanda ir ji yra arčiau gniuždomosios juostos, jos tamprieji kritiniai įtempiai apskaičiuojami taip (LST EN 1993-1-3, 5.39a form.):

$$\sigma_{cr,sa} = \frac{1,05 k_f E \sqrt{I_s t^3 s_1}}{A_{sa} s_2 (s_1 - s_2)} = \frac{1,05 \times 1,0 \times 2100000 \sqrt{794,04 \times 0,7^3 \times 186,98}}{34,14 \times 138,87 (186,98 - 138,87)} = 140,27 \text{ MPa},$$

čia $k_f = 1,0$ (imame su tam tikra atsarga),

$$S_1 = 0,9(S_a + S_{sa} + S_c) = 0,9(40,32 + 15,81 + 151,74) = 186,98 \text{ mm},$$

$$S_2 = S_1 - S_a - 0,5S_{sa} = 186,98 - 40,2 - 0,5 \times 15,81 = 138,87 \text{ mm}.$$

Kadangi juostose ir sienelėje yra sąstandos, tai skaičiavimams reikia taikyti patikslintus kritinius įtempius (LST EN 1993-1-3, 5.5.3.4.4 p.):

$$\sigma_{cr,mod} = \frac{\sigma_{cr,s}}{\sqrt[4]{1 + \left(\beta_s \frac{\sigma_{cr,s}}{\sigma_{cr,sa}} \right)^4}} = \frac{258,47}{\sqrt[4]{1 + \left(0,666 \frac{258,47}{140,27} \right)^4}} = 192,17 \text{ MPa},$$

$$\beta_s = 1 - \frac{(h_a - 0,5h_{sa})}{e_c} = 1 - \frac{40 - 0,5 \times 9}{106,39} = 0,666.$$

Klupumo koeficientas:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,mod}}} = \sqrt{\frac{320}{192,17}} = 1,29;$$

Kai $0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38$,

$$\chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 1,47 - 0,723 \times 1,29 = 0,537.$$

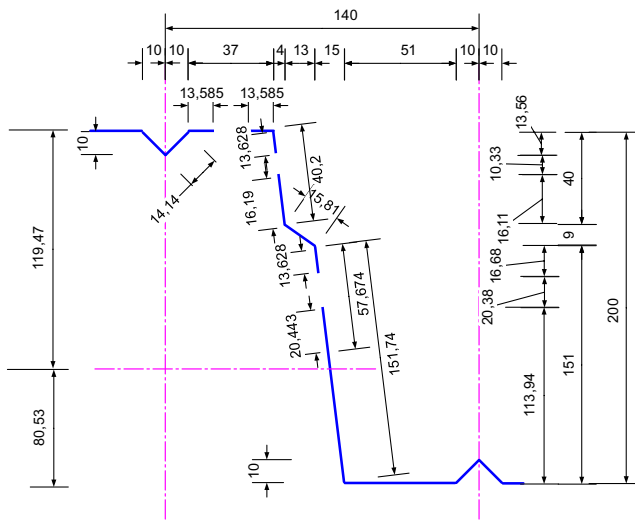
Redukuotas plotas:

$$A_{sa,red} = \frac{\chi_d A_{sa}}{1 - \frac{h_a - 0,5h_{sa}}{e_c}} = \frac{0,537 \times 34,14}{1 - \frac{40 - 0,5 \times 9}{106,39}} = 27,51 \text{ mm}^2 < A_{sa} = 34,14 \text{ mm}^2.$$

Sumažintas storis:

$$t_{red} = \chi_d t = 0,537 \times 0,7 = 0,376 \text{ mm}.$$

Efektinio skerspjūvio charakteristikos



Efektinio skerspjūvio galutiniai matmenys

Pagalbinis žymėjimas skaičiavimui supaprastinti:

$$s_{pap} = 151,74 - 56,674 + 20,443 = 115,509.$$

Plotas:

$$A_{eff} = 0,626 \left(\frac{10}{0,707} + 13,585 \right) + 0,7 (13,585 + 13,628) + \\ 0,376 (16,19 + 15,81 + 16,767) + 0,7 \left(115,509 + 51 + \frac{10}{0,707} \right) = 180,5 \text{ mm}^2.$$

Statinis momentas viršutinės juostos vidurinės linijos atžvilgiu:

$$S_{eff,0} = 0,626 \frac{10 \times 5}{0,707} + 0,7 \times 13,628 \frac{13,56}{2} + \\ 0,376 \left(16,19 \left(40 - \frac{16,11}{2} \right) + 15,81 \left(40 + \frac{9}{2} \right) + 16,767 \left(40 + 9 + \frac{16,68}{2} \right) \right) + \\ 0,7 \left(115,509 \left(200 - \frac{113,94}{2} \right) + 51 \times 200 + \frac{10}{0,707} (200 - 5) \right) = 21560 \text{ mm}^3.$$

Sunkio centro padėtis nuo viršutinės ir apatinės juostų:

$$e_{eff,c} = \frac{S_{eff,0}}{A_{eff}} = \frac{21560}{180,5} = 119,47 \text{ m}, \\ e_{eff,t} = h - e_{eff,c} = 200 - 119,47 = 80,53.$$

Inercijos momentas:

$$I_{eff} = 0,626 \left[\frac{10^3}{12} + \frac{10}{0,707} \left((119,47 - 5)^2 \right) + 13,585 \times 119,47^2 \right] + \\ 0,7 \left[13,585 \times 119,47^2 + \frac{13,56^3}{12} + 13,628 \left(119,47 - \frac{13,56}{2} \right)^2 \right] + \\ 0,376 \left[\frac{16,11^3}{12} + 16,19 \left(119,47 - 40 + \frac{16,11}{2} \right)^2 + \frac{9^3}{12} + 15,81 \left(119,47 - 40 - \frac{9}{2} \right)^2 + \right. \\ \left. \frac{16,68^3}{12} + 16,767 \left(119,47 - 40 - 9 - \frac{16,68}{2} \right)^2 \right] + \\ 0,7 \left[\frac{113,94^3}{12} + 115,509 \left(80,53 - \frac{113,94}{2} \right)^2 + 51 \times 80,53^2 + \frac{10^3}{12} + \frac{10}{0,707} (80,53 - 5)^2 \right] = \\ 1,092 \times 10^6 \text{ mm}^4.$$

Atsparumo momentai:

$$W_{eff,min} = \frac{I_{eff}}{e_{eff,c}} = \frac{1,092 \times 10^6}{119,47} = 9137 \text{ mm}^3,$$

$$W_{eff,max} = \frac{I_{eff}}{e_{eff,t}} = \frac{1,092 \times 10^6}{80,53} = 13560 \text{ mm}^3.$$

Vienos bangos lenkiamoji laikomoji galia:

$$M_{Rd} = \frac{W_{effmin} f_{yb}}{\gamma_{M0}} = 9137 \times 10^{-9} \times \frac{320 \times 10^3}{1,0} = 2,924 \text{ kNm}.$$

Išvada. Trapecinio lakštinio profiliuoto vienos bangos lenkiamoji laikomoji galia yra 2,924 kNm.

PRIEDAS

Plonasienių elementų lenkimas ir sukimas

Lenkiamieji elementai, kai skersinė apkrova neina per skerspjūvio šlyties centrą, yra veikiami lenkimo ir sukimo momentų. Paprastumo dėlei aptarsime plokščiojo lenkimo atvejį x - z plokštumoje. Tuomet normaliniai įtempiai yra statmeni skerspjūviui ir tangentiniai įtempiai skerspjūvio plokštumoje turi būti skaičiuojami taip:

nuo plokščiojo lenkimo:

σ_x – normaliniai įtempiai išilgai elemento,

τ_{xz} – tangentiniai įtempiai skerspjūvio plokštumoje z ašies kryptimi;

nuo sukimo:

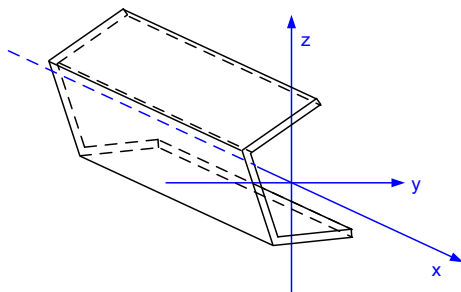
σ_ω – normaliniai įtempiai išilgai elemento dėl skerspjūvio iškraipos (angl. *warping*),

τ_t – sukimo tangentiniai įtempiai skerspjūvyje (Senvenano tangentiniai įtempiai),

τ_w – tangentiniai įtempiai skerspjūvyje dėl skerspjūvio iškraipos.

Bendruoju atveju išilginiai normaliniai įtempiai, tangentiniai įtempiai skerspjūvio plokštumoje ir sukimo tangentiniai įtempiai (σ_x , τ_{xz} , τ_t) apskaičiuojami pagal gerai žinomas medžiagų atsparumo formules.

Čia aptarsime, kaip apskaičiuojami įtempiai plonasieniuose elementuose (P.1 pav.), kai pridėta skersinė apkrova neina per šlyties centrą.



P.1 pav. Plonasienio elemento skerspjūvis

Šlyties centras

Skaičiuodami skerspjuvio sektorines charakteristikas, naudosime žymėjimus, parodytus P.2 pav.

Šlyties centro koordinatės apskaičiuojamos taip:

$$y_0 = \frac{I_{z\omega}}{I_y}, \quad z_0 = \frac{I_{y\omega}}{I_z}.$$

Sektorinės konstantos apskaičiuojamos taip:

sektoriniai tiesiniai ploto momentai:

$$I_{yw} = \int_0^l \omega y t \, ds,$$

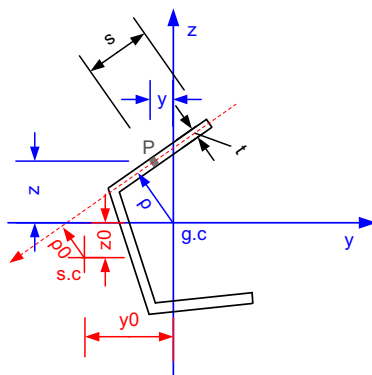
$$I_{zw} = \int_0^l \omega z t \, ds;$$

sektorinis inercijos momentas

$$I_{ww} = \int_0^l \omega^2 t \, ds;$$

sektorinis plotas

$$\omega = \int_0^l \rho \, ds.$$



P.2 pav. Plonasienio elemento skerspjuvio žymėjimai: g.c – skerspjuvio sunkio centras; y , z – skerspjuvio ašys; s.c – šlyties centras; y_0 , z_0 – šlyties centro koordinatės; t – sienelės storis; y , z – atstumai nuo sunkio centro iki taško P , esančio ant skerspjuvio vidurinės linijos; s – atstumas išilgai vidurinės linijos nuo vieno skerspjuvio krašto link taško P ; l – viso skerspjuvio vidurinės linijos ilgis; ρ – statmenas atstumas nuo skerspjuvio sunkio centro iki vidurinės linijos; ρ reikšmė yra teigiama, jei žiūrint iš taško P link teigiamos tangento krypties, sunkio centras yra į kairę.

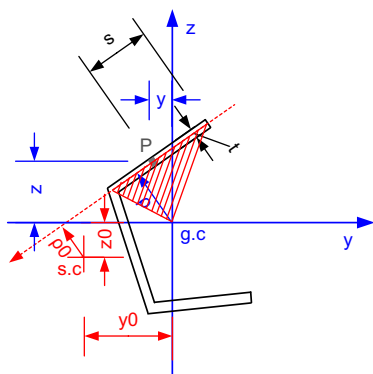
Sektorinis plotas (A.3 pav.) tai dvigubas trikampio plotas, kurį gauname judant taškui vidure linija nuo skerspjūvio pradžios iki tam tikros lanko s reikšmės. Dažniausiai imama tokia ženklų taisyklė: apėjimas pagal laikrodžio rodyklę – sektorinio ploto priaugis teigiamas. Polius pasirenkamas laisvai, bet dažnai sutapatinamas su sunkio centru. Jei sektorinį plotą nustatome šlyties centro atžvilgiu, tuomet turime svarbiausią sektorinį plotą.

Dažniausiai lankstyti profiliai sudaryti iš plokščiųjų elementų (P.4 pav.). Tuomet sektorinės charakteristikos supaprastintai gali būti apskaičiuojamos taip:

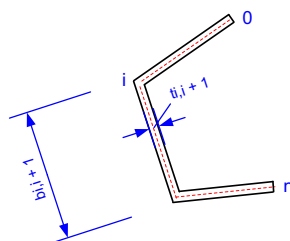
$$\omega_i = \sum_{i=0}^{i=j-1} \rho_{i,i+1} b_{i,i+1};$$

$$I_{wy} = \frac{1}{3} \sum_{i=0}^{i=n-1} (\omega_i y_i + \omega_{i+1} y_{i+1}) t_{i,i+1} b_{i,i+1} + \frac{1}{6} \sum_{i=0}^{i=n-1} (\omega_i y_{i+1} + \omega_{i+1} y_i) t_{i,i+1} b_{i,i+1};$$

$$I_{wz} = \frac{1}{3} \sum_{i=0}^{i=n-1} (\omega_i z_i + \omega_{i+1} z_{i+1}) t_{i,i+1} b_{i,i+1} + \frac{1}{6} \sum_{i=0}^{i=n-1} (\omega_i z_{i+1} + \omega_{i+1} z_i) t_{i,i+1} b_{i,i+1}.$$



P.3 pav. Plonasienio skerspjūvio sektorio ploto skaičiavimas

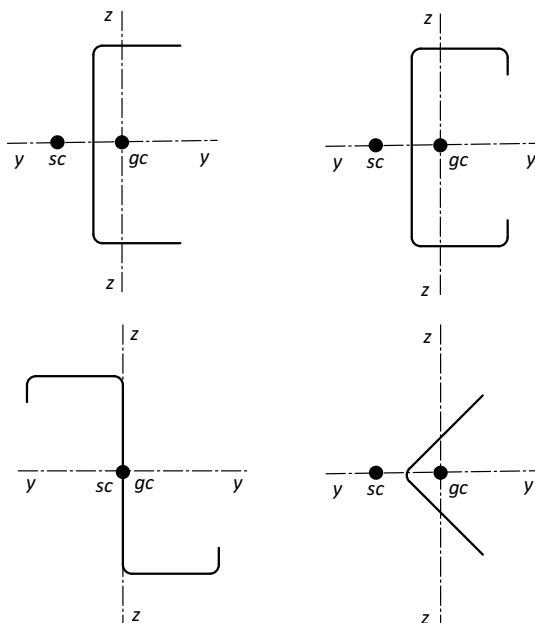


P.4 pav. Plonasienis skerspjūvis iš plokščiųjų elementų

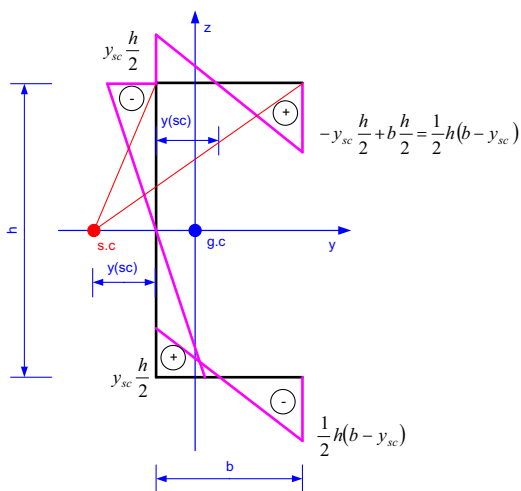
Skaičiuojant pagal šias formules paklaida skerspjūviams, kurie turi suapvalintus kampus, gali siekti iki 5 %.

Dažnai naudojamų plonasienių skerspjūvių sunkio centro ir šlyties centro padėties parodytos P.5 pav.

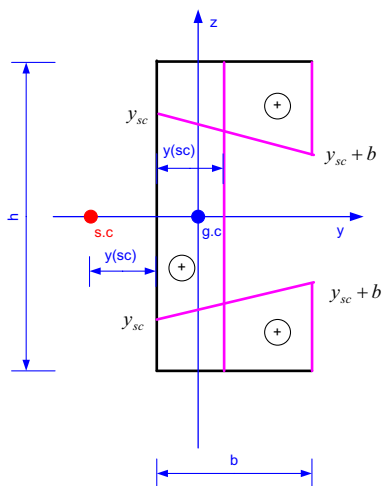
Dažnai patogų skerspjūvio sektorines konstantas parodyti grafiškai. Lovinio profilio sektorinis plotas ir koordinatės grafiškai parodytos P.6 pav.



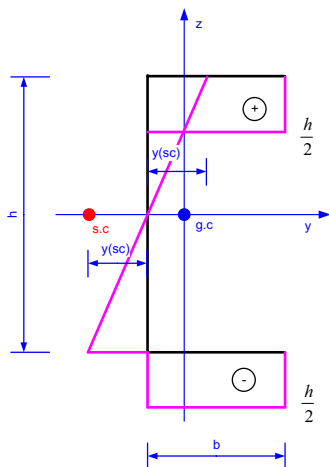
P.5 pav. Plonasienių skerspjūvių sunkio (gc) ir šlyties (sc) centrų padėtys



P.6.1 pav. Lovinio profilio sektorinio ploto diagrama



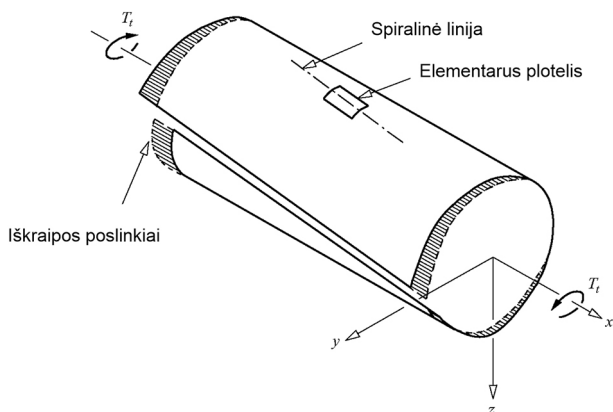
P.6.2 pav. Lovinio profilio y ašies koordinatės diagrama



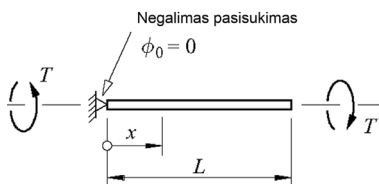
P.6.3 pav. Lovinio profilio z ašies koordinatės diagrama

Įtempiai nuo sukimo

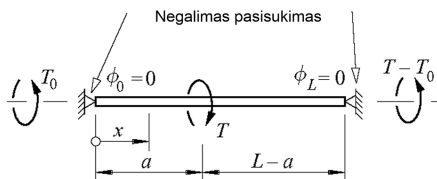
Plonasienio skerspjūvio elemento sukimo persikreipimas pateiktas P.7 pav. Galimi du sukimo atvejai. Nesuvaržyto sukimo atvejis, kai elementas yra suvaržytas nuo laisvo pasisukimo viename strypo gale (P.8 pav.), ir suvaržyto sukimo atvejis, kai elementas yra suvaržytas nuo laisvo pasisukimo abiejuose strypo galuose (P.9 pav.).



P.7 pav. Plonasienio skerspjūvio sukimas



P.8 pav. Plonasienio skerspjūvio nesuvaržytas sukimas



P.9 pav. Plonasienio skerspjūvio suvaržytas sukimas

Nesuvaržyto sukimo atvejis atsiranda tik τ_t – sukimo tangentiniai įtempiai skerspjūvyje (Senvenano tangentiniai įtempiai) ir jie skaičiuojami taip:

$$\tau_t = \tau_{t,\max} = \frac{Tt}{I_s},$$

čia T – sukimo momentas; t – elemento storis; I_s – skerspjūvio sukimo inercijos momentas.

Suvaržyto sukimo atveju atsiranda:

σ_ω – normaliniai įtempiai išilgai elemento dėl skerspjūvio iškraipos,

τ_t – sukimo tangentiniai įtempiai skerspjūvyje (Senvenano tangentiniai įtempiai),

τ_w – tangentiniai įtempiai skerspjūvyje dėl skerspjūvio iškraipos.

Sukimo tangentiniai įtempiai τ_t skerspjūvyje apskaičiuojami taip pat kaip nesuvaržyto sukimo atveju.

Normaliniai įtempiai išilgai elemento dėl skerspjūvio iškraipos apskaičiuojami taip:

$$\sigma_\omega = E\omega_n \frac{d^2\varphi}{dx^2},$$

čia E – tamprumo modulis; ω_n – svarbiausias sektorinis plotas; φ – skerspjūvio pasisukimo kampas (galima apskaičiuoti arba rasti literatūroje); ω_n – svarbiausias sektorinis plotas; tai sektorinis plotas, kai polių sutampa su šlyties centru ir $\int_A \omega dA = 0$.

Literatūroje pateikiami įvairūs būdai, kaip rasti svarbiausią sektorinį plotą, pvz., $\omega_n = \omega + C$, čia konstanta

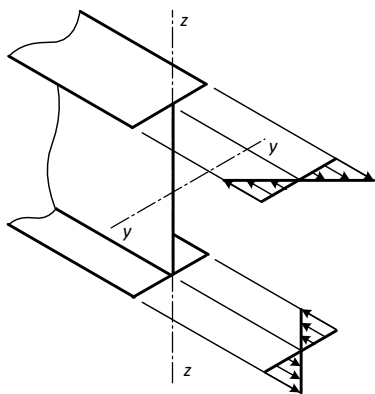
$$C = \frac{\int \omega dA}{A}.$$

Šie normaliniai įtempiai yra atsisveriantys (P.10 pav.), todėl jų iš pusiausvyros lygčių rasti negalima.

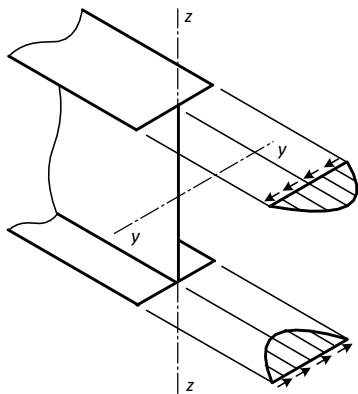
Tangentiniai įtempiai skerspjūvyje dėl skerspjūvio iškraipos apskaičiuojami taip:

$$\tau_w = \frac{ES_\omega \frac{d^3\phi}{dx^3}}{t},$$

čia $S_\omega = \int_0^z \omega_n t ds$ – sektorinis statinis momentas skerspjūvio dalies (vienos skerspjūvio dalies nuo taško P (P.3 pav.)). Šie tangentiniai įtempiai yra atsisveriantys (P.11 pav.), todėl jų iš pusiausvyros lygčių rasti negalima.



P.10 pav. Plonasienio dvitėjo suvaržyto skerspjūvio normaliniai iškraipos įtempiai



P.11 pav. Plonasienio dvitėjo suvaržyto skerspjūvio tangentiniai įtempiai

LITERATŪRA

- Galambos, T. V. 1998. *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*. Wiley & Sons. 911 p.
- Gardner, L.; Nethercot, D. A. 2005. *Designers' guide to EN 1993-1-1: eurocode 3: design of steel structures: general rules and rules for buildings*. London: Thomas Telford. 114 p.
- Gherzi, A. 2002. *Design of metallic cold-formed thin-walled members*. Spon Press. 164 p.
- Yu, W. W. 2000. *Cold-formed steel design*. Wiley. 756 p.
- LST EN 1993-1-1+AC Eurokodas 3. *Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. 2007 m.
- LST EN 1993-1-3 Eurokodas 3. *Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-3 dalis. Bendrosios taisyklės. Šaltai suformuotų elementų ir lakštų papildomos taisyklės*. 2008 m.
- LST EN 1993-1-5+AC Eurokodas 3. *Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-5 dalis. Lakštinių konstrukcijų elementai*. 2007 m.
- LST EN 1993-1-8+AC Eurokodas 3. *Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-8 dalis. Mazgų projektavimas*. 2007 m.
- Projektas ESDEP Course. Dalys WG7, WG9. 2008.
- Sputo, T.; Turner, J. L. 2006. *Bracing cold-formed steel structures : a design guide / - Reston (Va.)*. 144 p.
- Worked examples according to EN 1993-1-3*. ECCS technical committee 7. 2008, No. 123.

Alfonsas DANIŪNAS
PLONASIENĖS METALINĖS KONSTRUKCIJOS
Mokomoji knyga

Apimtis 4,06 aut. l.
Leidinio el. versija <http://doi.org/10.3846/1410-S>
Vilniaus Gedimino technikos universiteto leidykla
„Technika“, Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius
<http://leidykla.vgtu.lt>