

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvkonstrukciju katedra

KONSTRUKTĪVO ELEMENTU NO PULTRUZIJAS
KOMPOZĪTMATERĪALIEM APRĒĶINS
(aprēķinu pamatprincipi un piemēri)

Metodiskie norādījumi

Metodiskos norādījumos sniegtas ziņas par konstruktīvo elementu no pultrūzijas kompozītmateriāliem aprēķinu pamatprincipiem saskaņā ar pastāvošajiem celtniecības normatīvajiem dokumentiem. Parādīti spiesto, liekto un spiesti liekto elementu aprēķina piemēri un doti norādījumi par pultrūzijas kompozītmateriālu fizikālajām un mehāniskajām īpašībām.

Mācību līdzeklis paredzēts RTU Būvniecības specialitāšu studentiem. To var izmantot arī citu celtniecības specialitāšu studenti un celtniecības tehnikumu audzēkņi, kā arī projektēšanas organizāciju inženiertehniskie darbinieki.

Metodiskos norādījumus sastādīja asistents, M.Sc.Ing. Vadims Goremikins, profesors, Dr.Habil.Sc.Ing. Kārlis Rocēns un asoc.prof., Dr.Sc.Ing. Dmitrijs Serdjuks.

Recenzents: profesors, Dr.Habil.Sc.Ing. Felikss Bulavs

UDK 620.168+620.22-419.8](075.8)

Me 803

RTU
Rīga, 2010

ISBN 978-9934-8151-0-2

1. IEVADS

Kompozītmateriāls ir materiāls, kurš sastāv no ne mazāk par diviem atšķirīgiem materiāliem, kur parasti viens materiāls tiks izmantots, ka slodzi nesošs stiegrojums, bet otrais – lai sasaistīt stiegrojumu. Būvniecībā arvien plašāk izmanto plastmasas, kas ir stiegotas ar dažādas formas šķiedrām. Plastmasas, stiegotas ar šķiedrām, parasti sadala divās grupās: polimeru materiāli, stiegroti ar īsam šķiedrām un polimeri, stiegroti ar garām šķiedrām. Plastmasas, kas stiegotas ar īsam šķiedrām, iegūst ar injekcijas liešanas un ekstrūzijas paņēmieniem. Konstruktīvās plastmasas, kas stiegotas ar garām šķiedrām (lentām), iegūst ar pultrūzijas paņēmieni un izmanto slodzi nesošās būvju konstrukcijas un kuģu, lidaparātu un energobūvniecībā. Stiegotās plastmasās šķiedras uzņem spiedes un stiepes spēkus, bet polimērs (matricas materiāls) – bīdes spēkus, nodrošinot šķiedru kopēju darbu. [1,9]

Salīdzinot plastmasas (kompozītmateriālus) ar tradicionāliem materiāliem, piemēram tādām, ka tērauds, mēs varam iegūt ievērojamu īpatnējās stiprības (stiprības un tilpummasas attiecība) pieaugumu. Tā kā kompozītmateriāli ir materiālu kombinācija, tad atbilstoši projektējot tos, iespējams iegūt materiālus, kas ir piemēroti speciālām slodzēm. Citas kompozītmateriālu priekšrocības ir izturība pret ķīmiskām vielām, ka arī elektrības un siltuma pretestības īpašības. [1,7,8]

Galvenais pultrūzijas kompozītmateriālu trūkums ir noturības zudums lieces momenta darbības plaknē. Šo problēmu var atrisināt, pielietojot režgotās sistēmas. [2,3]

2. PULTRŪZIJAS PROFILU RAŽOŠANAS RAKSTUROJUMS

Pultrūzija ir process nepārtrauktai kompozītmateriāla profilu ražošanai ar pa tā garumu nemainīgu šķērsriezumu un materiāla īpašībām.

Pultrūzijas profilu ražošanas process: nepārtraukts stiegrojuma materiāls ir vilkts caur virzošo detaļu, kur šķiedras tiek ievietotas vajadzīgā virzienā pa profila garumu. Nākošā etapā šķiedras piesūcina ar

matricas materiālā. Tālāk kombinēto maisījumu no fibrām un matricas velk caur termisko apstrādi, kur notiek polimerizācijas process un profils iegūst savu paliekošo formu. Tālāk profilu velk caur griešanas mašīnu, kur to sagriež vajadzīgā garumā.

Pultrūzijas profili sastāv no trim galvenajām komponentēm: stiegrojums, matricas materiāla un dažādām piedevām.

Stiegrojuma galvenā loma kompozītmateriālā ir piešķirt stiprības un stinguma īpašības materiālam. Galvenie stiegrojuma veidi ir stikla, oglekļa un aramida šķiedras. Stikla šķiedras nodrošina plastmasai labas daudzpusīgas īpašības, oglekļa šķiedras – labu plastmasas stingumu, bet aramida šķiedras – labu plastmasas izturību pret triecieniem. Liela nozīme ir stiegrojuma orientācijai profilā, lai sasniegt dažādas īpašības dažādos virzienos. Var būt vienvirziena, savērpts, paklājveida ar haotisko izvietojumu, austs paklājveida vai kombinēts.

Matricas loma ir savienot šķiedras kopā un noturēt tās vietā. Ir trīs izplatītākie matricas tipi: poliesterā sveķu, epoksīda sveķu un fenolā sveķu. Poliesterā sveķu matricā nodrošina labas daudzpusīgas īpašības, epoksīdsveķu matricu lieto oglekļplasta stiegrojumam un fenolā sveķu matricu lieto kad ir vajadzīga paaugstināta ugunsizturība.

Piedevas pielieto, lai uzlabot atsevišķas plastmasas īpašības [1,8,9,10].

3. PULTRŪZIJAS PROFILU ĪPAŠĪBAS

Saskaņā ar [1] minimālas pultrūzijas profilu īpašības definē Eiropas standarts EN 13706. Pultrūzijas profilu, kurus ražo firma Fiberline Composites, īpašību raksturvērtības ir parādītās 1. tabulā.

1. tabula

Pultrūzijas kompozītmateriāla īpašību raksturvērtības [1]

		MPa	
Stinguma parametri			
Elastības modulis	E_{0°	23 000 / 28 000*	
Elastības modulis	E_{90°	8 500	
Bīdes modulis	G	3 000	
Puassona koeficients	$\nu_{0^\circ,90^\circ}$	0.23	
Puassona koeficients	$\nu_{90^\circ,0^\circ}$	0.09	
		MPa	
Stiprības parametri			
Lieces stiprība	$f_{b,0^\circ}$	240	
Lieces stiprība	$f_{b,90^\circ}$	100	
Stiepes stiprība	$f_{t,0^\circ}$	240	
Stiepes stiprība	$f_{t,90^\circ}$	50	
Spiedes stiprība	$f_{c,0^\circ}$	240	
Spiedes stiprība	$f_{c,90^\circ}$	70	
Bīdes stiprība	f_τ	25	
Pašmasas slodze	γ	18 kN/m ³	

* – Elastības modulis ir atkarīgs no profila ģeometrijas un stieģojuma.

Īpašību aprēķina vērtībās dabū, sadalot raksturvērtības ar parciālo faktoru materiāla īpašībām $\gamma_M = 1,3$.

Mehānisko īpašību aprēķina vērtības ilglaicīga slodzuma gadījumā firmas Fiberline Composites ražotai produkcijai ir parādītās 2. tabulā.

2. tabula

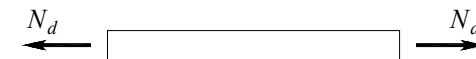
Pultrūzijas kompozītmateriāla īpašību aprēķina vērtības ilglaicīga slodzuma gadījumā [1]

Īpašība		MPa
Lieces stiprība	$f_{b,0^\circ,d}$	75
Lieces stiprība	$f_{b,90^\circ,d}$	30
Stiepes stiprība	$f_{t,0^\circ,d}$	75
Stiepes stiprība	$f_{t,90^\circ,d}$	30
Spiedes stiprība	$f_{c,0^\circ,d}$	75
Spiedes stiprība	$f_{c,90^\circ,d}$	30
Bīdes stiprība	$f_{\tau,d}$	8

4. KONSTRUKTĪVO ELEMENTU NO PULTRŪZIJAS KOMPOZĪTMATERIĀLIEM APRĒĶINS [1]

4.1. STIEPTO ELEMENTU APRĒĶINS

Stiepta elementa shēma parādīta 1. attēlā.



1.att. Stiepts elements

Maksimālo pieļaujamo stiepes slodzi N_d var noteikt pēc formulas:

$$N_d \leq \frac{A \cdot f_{t,0^\circ}}{\gamma_M}, \quad (1)$$

kur A – šķērsgriezuma laukums;
 $f_{t,0^\circ}$ – stiepes stiprības raksturvērtība;

γ_M – parciālais faktors materiāla īpašībai, pultrūzijas kompozītmateriāliem $\gamma_M = 1,3$;
 N_d – ass spēka aprēķina vērtība.

4.2. SPIESTO ELEMENTU APRĒĶINS

Spiesta elementa shēma parādīta 2. attēlā.



2.att. Spiests elements

Ass spēka aprēķina vērtībai N_d jābūt mazākai par kritisko kolonnas spēku N_{cr} . Kolonnas kritiska spēka vērtība ir atkarīga no kolonnas garuma. Garas kolonnas rēķina saskaņā ar Eilera slodze pēc formulas:

$$N_d \leq N_{cr} = \frac{F_d}{1 + \frac{F_d}{N_{el}}}, \quad (2)$$

kur N_{cr} – kolonnas kritiskais spēks;
 F_d – elementa nestspēja izejot no stiprības nosacījuma spiedē;
 N_{el} – spēks saskaņā ar elastības teoriju (Eilera spēks).

Elementa nestspēju izejot no stiprības nosacījuma spiedē F_d var izskaitļot pēc formulas:

$$F_d = \frac{A \cdot f_{c,0^\circ}}{\gamma_M}, \quad (3)$$

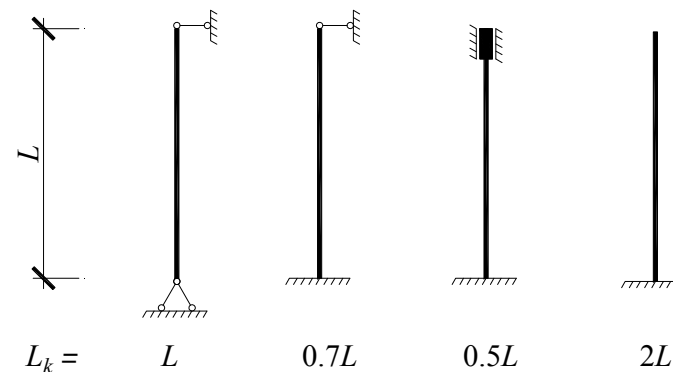
kur $f_{c,0^\circ}$ – spiedes stiprības raksturvērtība.

Eilera slodzei kolonnai izskaitļo pēc formulas [4]:

$$N_{el} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0^\circ} \cdot I}{\gamma_M \cdot L_k^2}, \quad (4)$$

kur E_{0° – elastības moduļa raksturvērtība;
 I – šķērsriezuma minimālais inerces moments;
 L_k – elementa efektīvais garums.

Elementa efektīvais garums ir atkarīgs no balstu nostiprinājuma veida. Efektīva garuma vērtības atkarībā no faktiskā garuma galvenajiem nostiprināšanas variantiem ir parādīti 3. attēlā.



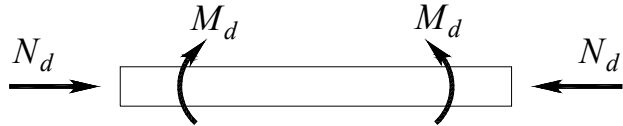
3. att. Kolonnas efektīva garuma noteikšana.

L_k – efektīvais garums, L – faktiskais garums

Ja nosacījums $N_d < N_{cr}$ izpildās, tad kolonnas noturība būs nodrošināta.

4.3. SPIESTI LIEKTO ELEMENTU APRĒĶINS

Spiesti liektus elementus (4. att.) pārbauda pēc pirmā robežstāvokļa.



4.att. Stiepti liekts elements

Normālais spiedes spēks un lieces moments ir savstarpēji atkarīgi, tā kā šķērss izliece kopā ar normālo spēku izsauc momentu profilā (iespējamību izliecei).

To ievērtē reizinot lieces momentu (kurš aprēķināts, neņemot vērā izlieci) ar pastiprinājuma faktoru.

Spiesti liekto elementu pārbauda uz maksimālo spiedes spriegumu profilā:

$$\sigma_{\max} \leq \frac{f_{c,0^\circ}}{\gamma_M}, \quad (5)$$

kur σ_{\max} – maksimālais spiedes spriegums profilā;
 $f_{c,0^\circ}/\gamma_M$ – spiedes stiprības aprēķina vērtība.

Maksimālo spiedes spriegumu profilā var noteikt pēc formulas:

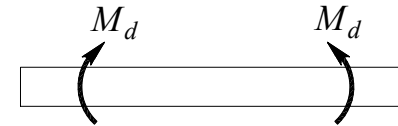
$$\sigma_{\max} = \frac{N_d}{A} + \frac{1}{1 - \frac{N_d}{N_{cr}}} \cdot \frac{M_d}{W}, \quad (6)$$

kur N_d – spiedes ass spēka aprēķina vērtība;
 M_d – lieces momenta aprēķina vērtība (kas aprēķināta neņemot vērā profila deformācijas);

A – profila šķērsriezuma laukums;
 W – profila šķērsriezuma minimālais pretestības moments;
 N_{cr} – profila spiedes kritiskais spēks.

4.4. LIEKTO ELEMENTU APRĒĶINS

Liektus elementus (5. att.) pārbauda pēc pirmā robežstāvokļa un lietojamības robežstāvokļa.



5.att. Liekts elements

Pirmā robežstāvokļa pārbaude:

Pārbaude uz lieci:

$$\frac{M_d}{W} \leq \frac{f_{b,0^\circ}}{\gamma_M}, \quad (7)$$

kur M_d – lieces momenta aprēķina vērtība;
 W – šķērsriezuma pretestības moments;
 $f_{b,0^\circ}$ – lieces stiprības raksturvērtība;
 γ_M – parciālais faktors materiāla īpašībai.

Pārbaude uz bīdi:

$$\frac{V_d}{A_k} \leq \frac{f_\tau}{\gamma_M}, \quad (8)$$

kur V_d – šķērsspēka aprēķina vērtība;
 A_k – šķērsriezuma bīdes laukums;

f_τ – bīdes stiprības raksturvērtība.

Lietojamības pārbaude:
Pārvietojumu limits:

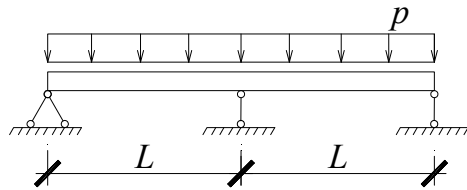
$$\frac{\delta_{\max}}{L} \leq \frac{1}{\alpha}, \quad (9)$$

kur δ – izliece, kuru rēķina no slodzes raksturvērtības;

L – laidums;

$1/\alpha$ – no lietojamības viedokļa Eironormas rekomendēta pieļaujam (galīga) izliece, ko praktiskā projektēšanā parasti piemēro mazākiem laidumiem – 1/200, lielākiem laidumiem – 1/400.

Starp liektiem elementiem atsevišķi var izdalīt brīvi balstītās ar izkliedēto slodzi slogotas sijas (6. att.):



6.att. Brīvi balstīta sija

Sijas pirmā robežstāvokļa pārbaude:
Pārbaude uz lieci:

$$\frac{k_M \cdot p_d \cdot L^2}{W} \leq \frac{f_{b,0^\circ}}{\gamma_M}, \quad (10)$$

kur k_M – koeficients, kurš raksturo maksimālo momentu (sk. 3. tabulu);
 p_d – izkliedētas slodzes aprēķina vērtība.

Pārbaude uz bīdi:

$$\frac{k_V \cdot p_d \cdot L}{A_k} \leq \frac{f_\tau}{\gamma_M}, \quad (11)$$

kur k_V – koeficients, kurš raksturo maksimālo šķērsspēku (sk. 2. tabulu);

Lietojamības pārbaude:
Pārvietojumu limits:

$$\frac{\delta_{\max}}{L} \leq \frac{1}{\alpha}, \quad (12)$$

Maksimālo pārvietojumu sijai, neievērojot ilgstošo slodzes iedarbību, var atrast pēc formulās:

$$\delta_{\max} = \frac{k_{\delta M} \cdot q_k \cdot L^4}{E_{0^\circ} \cdot I} + \frac{k_{\delta V} \cdot q_k \cdot L^2}{G \cdot A_k}, \quad (13)$$

kur $k_{\delta M}$ – koeficients, kurš raksturo maksimālo pārvietojumu no lieces momenta (sk. 3. tabulu);

$k_{\delta V}$ – koeficients, kurš raksturo maksimālo pārvietojumu no šķērsspēka (sk. 3. tabulu);

q_k – izkliedētas slodzes raksturvērtība;

E_{0° – elastības moduļa raksturvērtība;

G – bīdes moduļa raksturvērtība;

I – šķērsriezuma inerces moments.

3. tabula

Sijas raksturojošo koeficientu vērtības

Koeficients	Viens laidums	Divi laidumi	Trīs laidumi
$k_M = M / p_d \cdot L^2$	0,125	0,125	0,100
$k_V = V / p_d \cdot L$	0,500	0,625	0,600
$k_{\delta, M} = \delta_{\max, \text{moment}} \cdot E \cdot I / q_k \cdot L^4$	0,01302	0,00542	0,00688
$k_{\delta, V} = \delta_{\max, \text{shear}} \cdot G \cdot A_k / q_k \cdot L^2$	0,125	0,125	0,125

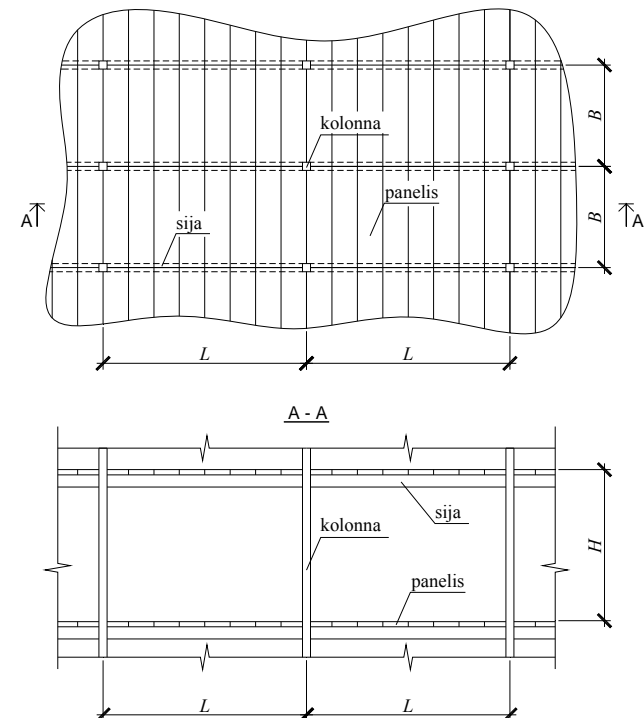
5. APRĒĶINA PIEMĒRI

5.1. CENTRISKI SPIESTAS KOLONNAS APRĒĶINA PIEMĒRS

Dots:

Sabiedriska ēka ar kolonnu soli $L = 4 \text{ m}$ garenvirzienā un $B = 2 \text{ m}$ šķērsvirzienā. Stāva augstums $H = 3 \text{ m}$ (7. att.). Ēkas pārsegums sastāv no pultrūzijas kompozītmateriālu I-tipa profilu sijām Nr. 240 x 120 x 12, uz kurām balstās plātnes no pultrūzijas kompozītmateriāliem. Sijas balstās uz kolonnām no pultrūzijas kompozītmateriālu kvadrātveida caurulēm. Grīdas seguma materiāls – lamināts. Griestu materiāls – plastika plātnes.

Uzdevums: piemēklēt vidējas kolonnas šķērsriezumu.



7.att. Ēkas plāna fragments un griezumus

Atrisinājums:

1) Slodžu, kas darbojas uz kolonnu, noteikšana:

Pēc EN 1991-1-1 [6] sabiedriskā ēka atbilst C3 kategorijas telpu izmantošanas raksturam.

Lietderīgas slodzes uz grīdu raksturvērtība:

$$Q_k = 4,5 \text{ kN/m}^2;$$

Pastāvīgas slodzes no sijām raksturvērtība:

$$g_{k,1} = 10,1 \text{ kg/m};$$

Pastāvīgas slodzes no plātnēm raksturvērtība:

$$g_{k,2} = 17 \text{ kg/m}^2;$$

Pastāvīgas slodzes no lamināta (biezums – 8 mm) raksturvērtība:

$$g_{k,3} = 0,008 \cdot 660 = 5,3 \text{ kg/m}^2;$$

Pastāvīgas slodzes no griestiem raksturvērtība:

$$g_{k,4} = 3,5 \text{ kg/m}^2;$$

Kolonnas pašsvara slodzes raksturvērtība (pieņemam sākotnējo profilu Nr. 160 x 160 x 8):

$$g_{k,5} = 8,86 \text{ kg/m};$$

Koncentrētas slodzes uz kolonnu aprēķina vērtība [5]:

$$P = Q_k \cdot L \cdot B \cdot \gamma_Q + (g_{k,1} \cdot L + g_{k,2} \cdot L \cdot B + g_{k,3} \cdot L \cdot B + g_{k,4} \cdot L \cdot B + g_{k,5} \cdot H) \cdot \gamma_G,$$

$$P = 4,5 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 1,5 + (10,1 \cdot 4 + 17 \cdot 4 \cdot 2 + 5,3 \cdot 4 \cdot 2 + 3,5 \cdot 4 \cdot 2 + 8,86 \cdot 3) \cdot 1,35 = 423 \text{ kN},$$

kur $\gamma_Q = 1,5$ – parciālais faktors lietderīgai slodzei;

$\gamma_G = 1,35$ – parciālais faktors pastāvīgai slodzei.

2) Kolonnas šķērsriezuma piemeklēšana:

Kolonnas šķērsriezumu visvienkāršāk piemeklēt ar nejaušanas meklēšanas metodi: pieņēmām nejauši paņemto profilu un pārbaudām. Ja profils der, tad pārbaudām, vai derēs profils ar mazāko šķērsriezumu, ja neder, tad pārbaudām profilu ar lielāku šķērsriezumu. Metodi visvienkāršāk realizēt ar datora palīdzību.

Pārbaudīsim profilu Nr. 160 x 160 x 8.

Pēc pielikuma Nr. 3. noteiksim profila ģeometriskus raksturlielumus:

Šķērsriezuma laukums:

$$A = 49,19 \text{ cm}^2;$$

Šķērsriezuma inerces moments:

$$I_x = I_y = 1\,910 \text{ cm}^4.$$

Pēc pielikuma Nr. 3. un 1. tabulas noteiksim materiāla fizikāli mehāniskās īpašības:

Elastības modulis:

$$E_{0^\circ} = 23\,000 \text{ MPa};$$

Profila pretestības raksturvērtība spiedē:

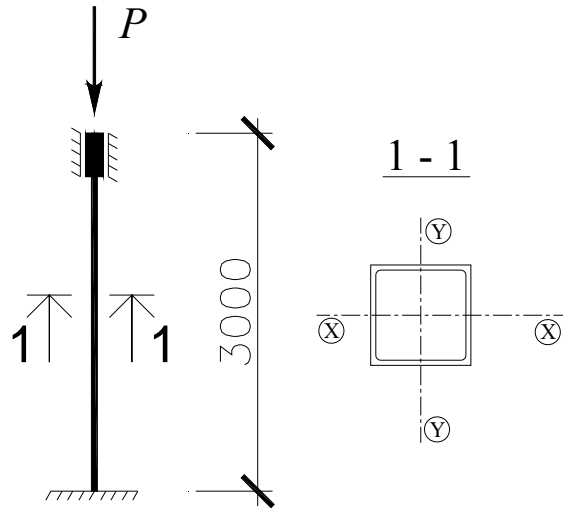
$$f_{c,0^\circ} = 240 \text{ MPa};$$

Materiāla parciālais drošības faktors:

$$\gamma_M = 1,3.$$

3) Kolonnas pārbaude:

Kolonnas aprēķina shēma ir parādīta 8. attēlā.



8. att. Centriski spiestas kolonnas aprēķina shēma

Kolonnas kritiskā spēka noteikšana:

$$N_{cr} = \frac{F_d}{1 + \frac{F_d}{N_{el}}},$$

kur N_{cr} – kolonnas kritiskais spēks;

F_d – elementa nestspēja izejot no stiprības nosacījuma spiedē;

N_{el} – slodze saskaņā ar elastības teoriju (Eilera slodze).

Elementa nestspēju izejot no stiprības nosacījuma spiedē var izskaitļot pēc formulas:

$$F_d = \frac{A \cdot f_{c,0^{\circ}}}{\gamma_M} = \frac{49,19 \cdot 10^{-4} \cdot 240 \cdot 10^6}{1,3} \cdot 10^{-3} = 908 \text{ kN},$$

Eilera slodzi kolonnai izskaitļo pēc formulas:

$$N_{el} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0^{\circ}} \cdot I_x}{\gamma_M \cdot L_k^2} = \frac{\pi^2 \cdot 23 \cdot 10^9 \cdot 1910 \cdot 10^{-8}}{1,3 \cdot 1,5^2} \cdot 10^{-3} = 1480 \text{ kN},$$

kur L_k – kolonnas efektīvais garums, kurš ir noteikts pēc 3. attēlā:

$$L_k = 0,5 \cdot L = 0,5 \cdot 3 = 1,5 \text{ m}.$$

Noteiksim kolonnas kritisko spēku:

$$N_{cr} = \frac{F_d}{1 + \frac{F_d}{N_{el}}} = \frac{908}{1 + \frac{908}{1480}} = 562 \text{ kN}.$$

Pārbaudām izvēlēto profilu uz noturību:

$$P = N_d = 423 \text{ kN} < N_{cr} = 562 \text{ kN},$$

Izvēlētais profils der.

4) Pārbaudīsim profilu ar mazāko šķērsriezumu Nr.120x120x8:

Profila ģeometriskie raksturlielumi:

Šķērsriezuma laukums:

$$A = 36,0 \text{ cm}^2;$$

Šķērsriezuma inerces moments:

$$I_x = I_y = 757 \text{ cm}^4.$$

Elementa nestspēja izejot no stiprības nosacījuma spiedē:

$$F_d = \frac{A \cdot f_{c,0}}{\gamma_M} = \frac{36,0 \cdot 10^{-4} \cdot 240 \cdot 10^6}{1,3} \cdot 10^{-3} = 664 \text{ kN},$$

Eilera slodzi kolonnai izskaitļo pēc formulas:

$$N_{el} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0^o} \cdot I_x}{\gamma_{m,E} \cdot L_k^2} = \frac{\pi^2 \cdot 23 \cdot 10^9 \cdot 757 \cdot 10^{-8}}{1,3 \cdot 1,5^2} \cdot 10^{-3} = 586 \text{ kN},$$

kur L_k – kolonnas efektīvais garums, kurš ir noteikts pēc 3. attēlā:

$$L_k = 0,5 \cdot L = 0,5 \cdot 3 = 1,5 \text{ m}.$$

Noteiksim kolonnas kritisko spēku:

$$N_{cr} = \frac{F_d}{1 + \frac{F_d}{N_{el}}} = \frac{664}{1 + \frac{664}{586}} = 311 \text{ kN}.$$

Pārbaudām izvēlēto profilu uz noturību:

$$P = N_d = 423 \text{ kN} < N_{cr} = 311 \text{ kN},$$

Izvēlētais profils neder, tātad pieņemam profilu Nr. 160 x 160 x 8.

Atbilde:

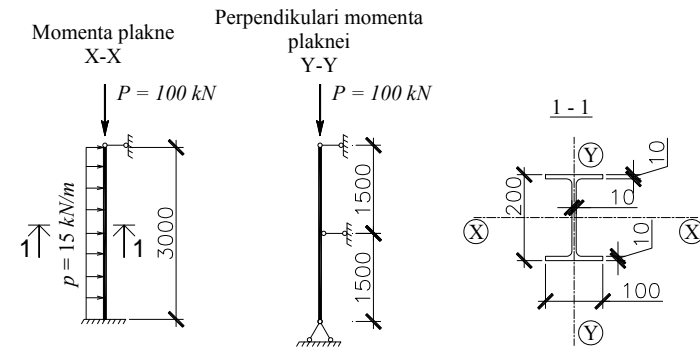
Kvadrātveida profilu Nr. 160 x 160 x 8 var izmantot dotai ēkai.

5.2. SPIESTI LIEKTAS KOLONNAS APRĒĶINA PIEMĒRS

Dots:

Spiesti liekta kolonna ar šķērsriezumu no I tipa profila 200 x 100 x 10 mm. Kolonnas garums – 3 m (9. att.). Uz kolonnu darbojās izkliedētā slodze $p = 15 \text{ kN/m}$ un vertikāla slodze $P = 100 \text{ kN}$. Perpendikulāri momenta darbības plaknei kolonna ir nostiprināta ar saitēm.

Uzdevums: pārbaudīt doto kolonnu.



9. att. Spiesti liektas kolonnas aprēķina shēma

Atrisinājums:

1) Pēc pielikuma Nr. 1. noteiksim profila ģeometriskus raksturlielumus:

Šķērsriezuma laukums:

$$A = 38,86 \text{ cm}^2;$$

Šķērsriezuma inerces moments momenta plaknē:

$$I_x = 2 \,359 \text{ cm}^4;$$

Šķērsriezuma inerces moments perpendikulāri momenta plaknei:

$$I_y = 168 \text{ cm}^4;$$

Šķērsriezuma pretestības moments momenta plaknē:

$$W_x = 235 \text{ cm}^3.$$

2) Pēc pielikuma Nr. 1. un 1. tabulas noteiksim materiāla fizikāli mehāniskās īpašības:

Elastības modulis:

$$E_{0^\circ} = 28\,000 \text{ MPa};$$

Profila pretestības raksturvērtība spiedē:

$$f_{c,0^\circ} = 240 \text{ MPa};$$

Materiāla parciālais drošības faktors:

$$\gamma_M = 1,3;$$

3) Piepūļu noteikšana:

No statiskā aprēķina:

Maksimālais lieces moments:

$$M_d = 16,9 \text{ kN/m};$$

Maksimālais ass spēks:

$$N_d = 100 \text{ kN}.$$

4) Profila pārbaude momenta darbības plaknē (X-X plaknē), ka spiesti liekto elementu:

Spiesti liekto elementu pārbauda uz maksimālo spiedes spriegumu profilā:

$$\sigma_{\max} \leq \frac{f_{c,0^\circ}}{\gamma_M},$$

kur σ_{\max} – maksimālais spiedes spriegums profilā;

$f_{c,0^\circ}/\gamma_M$ – spiedes stiprības aprēķina vērtība.

Maksimālo spiedes spriegumu profilā var noteikt pēc formulas:

$$\sigma_{\max} = \frac{N_d}{A} + \frac{1}{1 - \frac{N_d}{N_{cr}}} \cdot \frac{M_d}{W},$$

kur N_{cr} – profila spiedes kritiskais spēks.

Kolonnas kritisko spēku var noteikt pēc formulas:

$$N_{cr} = \frac{F_d}{1 + \frac{F_d}{N_{el}}},$$

F_d – spiedes slodze;

N_{el} – slodze saskaņā ar elastības teoriju (Eilera slodze).

Spiedes slodzi var izskaitļot no materiāla stiprības nosacījuma spiedē pēc formulas:

$$F_d = \frac{A \cdot f_{c,0^\circ}}{\gamma_M} = \frac{38,86 \cdot 10^{-4} \cdot 240 \cdot 10^6}{1,3} \cdot 10^{-3} = 717 \text{ kN},$$

Eilera slodzi kolonnai izskaitļo pēc formulas:

$$N_{el,x} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0^\circ} \cdot I_x}{\gamma_{m,E} \cdot L_{k,x}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 28 \cdot 10^9 \cdot 2359 \cdot 10^{-8}}{1,3 \cdot 2,1^2} \cdot 10^{-3} = 1137 \text{ kN},$$

kur $L_{k,x}$ – kolonnas efektīvais garums, kurš ir noteikts pēc 3. attēlā:

$$L_{k,x} = 0,7 \cdot L_x = 0,7 \cdot 3 = 2,1 \text{ m}.$$

Noteiksim kolonnas kritisko spēku:

$$N_{cr,x} = \frac{F_d}{1 + \frac{F_d}{N_{el,x}}} = \frac{717}{1 + \frac{717}{1137}} = 439 \text{ kN}.$$

Maksimālais spiedes spriegums profilā:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{N_d}{A} + \frac{1}{1 - \frac{N_d}{N_{cr,x}}} \cdot \frac{M_d}{W_x} = \frac{100 \cdot 10^3}{38,86 \cdot 10^{-4}} \cdot 10^{-6} + \\ &+ \frac{1}{1 - \frac{100}{494}} \cdot \frac{16,9 \cdot 10^3}{235 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 25,7 + 90,2 = 118 \text{ MPa}; \end{aligned}$$

Spiedes stiprības aprēķina vērtība:

$$f_{c,0^\circ}/\gamma_M = 240 / 1,3 = 185 \text{ MPa}.$$

Pārbaude:

$$\sigma_{\max} = 118 \text{ MPa} < f_{c,0^\circ}/\gamma_M = 185 \text{ MPa},$$

Pārbaude izpildās.

5) Profila pārbaude perpendikulāri lieces momenta darbības plaknei (Y-Y plaknē), ka centriski spiesto elementu:

Centriski spiesto elementu pārbauda uz pēc formulas:

$$N_d \leq N_{cr}.$$

Kolonnas kritisko spēku var noteikt pēc formulas:

$$N_{cr} = \frac{F_d}{1 + \frac{F_d}{N_{el}}},$$

Eilera slodzi kolonnai izskaitļo pēc formulas:

$$N_{el,y} = \frac{\pi^2 \cdot E_{0^\circ} \cdot I_y}{\gamma_M \cdot L_{k,y}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 28 \cdot 10^9 \cdot 168 \cdot 10^{-8}}{1,3 \cdot 1,5^2} \cdot 10^{-3} = 158 \text{ kN},$$

kur $L_{k,y}$ – kolonnas efektīvais garums starp nostiprinājumiem, kurš ir noteikts pēc 3. attēlā:

$$L_{k,y} = 1 \cdot L_y = 1 \cdot 1,5 = 1,5 \text{ m}.$$

Kolonnas kritiskais spēks:

$$N_{cr,y} = \frac{F_d}{1 + \frac{F_d}{N_{el,y}}} = \frac{717}{1 + \frac{717}{158}} = 129 \text{ kN}.$$

Pārbaude:

$$N_d = 100 < N_{cr} = 129 \text{ kN},$$

Pārbaude izpildās.

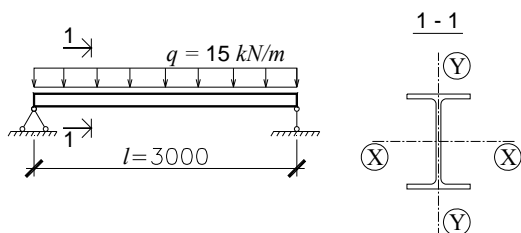
5.3. BRĪVI BALSTĪTAS LIEKTAS SIJAS APRĒĶINA PIEMĒRS

Dots:

Liekta vienlaiduma brīvi balstītā sija ar laidumu 3 m. Sija ir slogota ar vienmērīgi izkliedēto slodzi $q = 15 \text{ kN/m}$ (10. att.). Parciālais faktors slodzei $\gamma_Q = 1,5$.

Uzdevums:

Piemeklēt vajadzīgo I tipa profilu un veikt nepieciešamas pārbaudes.



10. att. Liektas sijas aprēķina shēma

Atrisinājums:

1) Sijas šķērsriezumu piemeklēsim pēc pieļaujamas pārvietojuma komponentes no lieces momenta:

$$\frac{\delta_{M,\max}}{L} \leq \frac{1}{\alpha};$$

$1/\alpha$ pieņemam vienādu ar $1/200$.

Tad vajadzīgo inerces momentu var atrast pēc formulas:

$$I_x = \frac{\alpha \cdot k_{\delta M} \cdot q_k \cdot L^3}{E_{0^\circ}} = \frac{200 \cdot 0,01302 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 3^3}{28000 \cdot 10^6} \cdot 10^8 = 3766 \text{ cm}^4,$$

kur $k_{\delta M} = 0,01302$ – koeficients, kurš raksturo maksimālo pārvietojumu no lieces momenta, pēc 2. tabulas;

$q_k = 10 \text{ kN/m}$ – izkliedētas slodzes raksturvērtība;

$E_{0^\circ} = 28\,000 \text{ MPa}$ – elastības moduļa raksturvērtība;

$L = 3 \text{ m}$ – sijas laidums;

Pēc pielikuma Nr.1. izvēlamies profilu I 240x120x12.

Pārbaudīsim izvēlēto profilu.

2) Izvēlēta profila šķērsriezuma ģeometriskās raksturlielumi:

Šķērsriezuma pretestības moments:

$$W_x = 407 \text{ cm}^3.$$

Šķērsriezuma bīdes laukums:

$$A_k = 27,4 \text{ cm}^2;$$

Šķērsriezuma inerces moments:

$$I_x = 4891 \text{ cm}^4;$$

3) Pēc pielikuma Nr. 1. un 1. tabulas noteiksim materiāla fizikāli mehāniskās īpašības:

Elastības modulis:

$$E_{0^\circ} = 28\,000 \text{ MPa};$$

Profila pretestības raksturvērtība liecē:

$$f_{b,0^\circ} = 240 \text{ MPa};$$

Materiāla parciālais (drošuma) faktors:

$$\gamma_M = 1,3;$$

4) Sijas pirmā robežstāvokļa pārbaude:

4.1) Pārbaude uz lieci:

$$\frac{k_M \cdot p_d \cdot L^2}{W} \leq \frac{f_{b,0^\circ}}{\gamma_M},$$

$$\frac{0,125 \cdot 22,5 \cdot 10^3 \cdot 3^2}{407 \cdot 10^{-6}} \cdot 10^{-6} = 62 \text{ MPa} < \frac{240}{1,3} = 185 \text{ MPa},$$

kur $k_M = 0,125$ – koeficients, kurš raksturo maksimālo lieces momentu, pēc 2. tabulas;

$p_d = q \cdot \gamma_Q = 15 \cdot 1,5 = 22,5 \text{ kN} / \text{m}$ – aprēķina slodze;

$f_{b,0^\circ} = 240 \text{ MPa}$ – lieces stiprības raksturvērtība;

$\gamma_M = 1,3$ – parciālais faktors materiāla īpašībai.

Pārbaude izpildās.

4.2) Pārbaude uz bīdi:

$$\frac{k_V \cdot p_d \cdot L}{A_k} \leq \frac{f_t}{\gamma_M},$$

$$\frac{0,5 \cdot 22,5 \cdot 10^3 \cdot 3}{27,4 \cdot 10^{-4}} \cdot 10^{-6} = 12,3 \text{ MPa} < \frac{25}{1,3} = 19,2 \text{ MPa}$$

kur $k_V = 0,5$ – koeficients, kurš raksturo maksimālo šķērsspēku, pēc 2. tabulas;

$f_t = 25 \text{ MPa}$ – bīdes stiprības raksturvērtība.

5) Lietojamības pārbaude:

Pārvietojumu limits:

$$\frac{\delta_{\max}}{L} \leq \frac{1}{\alpha},$$

Maksimālo pārvietojumu sijai, neievērojot ilgstošo slodzes iedarbību, var atrast pēc formulās:

$$\delta_{\max} = \frac{k_{\delta M} \cdot q_k \cdot L^4}{E_{0^\circ} \cdot I} + \frac{k_{\delta V} \cdot q_k \cdot L^2}{G \cdot A_k} = \frac{0,01302 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 3^4}{28000 \cdot 10^6 \cdot 4891 \cdot 10^{-8}} +$$

$$+ \frac{0,125 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 3^2}{3000 \cdot 10^6 \cdot 27,4 \cdot 10^{-4}} = 0,0116 + 0,0021 = 0,0137 \text{ m},$$

kur $k_{\delta M} = 0,01302$ – koeficients, kurš raksturo maksimālo pārvietojumu no lieces momenta, pēc 2. tabulas;

$k_{\delta V} = 0,125$ – koeficients, kurš raksturo maksimālo pārvietojumu no šķērsspēka, pēc 2. tabulas;

q_k – izklidētas slodzes raksturvērtība;

$E_{0^\circ} = 28\,000 \text{ MPa}$ – elastības moduļa raksturvērtība;

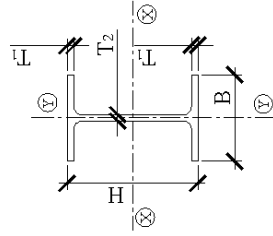
$G = 3\,000 \text{ MPa}$ – bīdes moduļa raksturvērtība;

Pārvietojumu pārbaude:

$$\frac{\delta_{\max}}{L} = \frac{0,0137}{3} = \frac{1}{219} \leq \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{200},$$

Pārbaude izpildās.

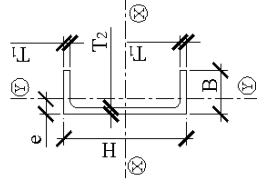
Firmas Fiberline Composites I-tipa profilu sortiments



Apzīmējumi: H – profila augstums, B – plaukta platums, T_1 – plaukta biezums, T_2 – sienīņas biezums, R – liekuma rādiuss, A – šķēsgriezuma laukums, A_k – šķēsgriezuma bīdes laukums, g – lineārais blīvums, I – šķēsgriezuma inerces moments, W – šķēsgriezuma pretestības moments, E_0 – elastības modulis.

Nr. (H x B x T_1 / T_2 , mm)	R, mm	A_y , cm ²	$A_{k,y}$, cm ²	$A_{k,x}$, cm ²	g, kg/m	I_{xx} , cm ⁴	W_{xx} , cm ³	I_{yy} , cm ⁴	W_{yy} , cm ³	E_0 , MPa
I 120 x 60 x 6 / 6	7.5	14.16	6.8	5.8	2.55	310.36	51.73	21.91	7.30	23000
I 160 x 80 x 8 / 8	8	24.87	12.2	10.2	4.48	966.17	120.77	69.08	17.27	28000
I 200 x 100 x 10 / 10	10	38.86	19.0	16.0	6.99	2 358.82	235.88	168.65	33.73	28000
I 240 x 120 x 12 / 12	12	55.96	27.4	23.0	10.07	4 891.25	407.60	349.70	58.28	28000
I 300 x 150 x 15 / 15	15	87.43	42.8	36.0	15.74	11 941.52	796.10	853.77	113.84	28000
I 360 x 180 x 18 / 18	18	125.90	61.6	51.8	22.66	24 761.94	1 375.66	1 770.38	196.71	28000
IL 120 x 60 x 5 / 5	5	11.71	5.7	4.8	2.11	260.19	43.37	18.14	6.05	23000
IL 160 x 80 x 8 / 5	8	20.55	7.6	10.2	3.70	875.92	109.49	68.51	17.13	28000
IL 200 x 100 x 8 / 5	8	25.75	9.5	12.8	4.64	1 744.42	174.44	133.61	26.72	28000
IL 240 x 120 x 10 / 7	10	40.26	16.0	19.2	7.25	3 813.52	317.79	288.84	48.14	28000
IL 300 x 150 x 12 / 8	12	59.32	22.8	28.8	10.68	9 097.33	606.49	676.79	90.24	28000
IL 360 x 180 x 15 / 10	15	88.93	34.2	43.2	16.01	19 578.09	1 087.67	1 462.25	162.47	28000

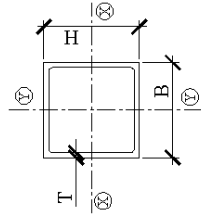
Firmas Fiberline Composites U-tipa profilu sortiments



Apzīmējumi: H – profila augstums, B – plaukta platums, T_1 – plaukta biezums, T_2 – sienīņas biezums, R – liekuma rādiuss, A – šķēsgriezuma laukums, A_k – šķēsgriezuma bīdes laukums, g – lineārais blīvums, I – šķēsgriezuma inerces moments, W – šķēsgriezuma pretestības moments, E_0 – elastības modulis.

Nr. (H x B x T_1 / T_2 , mm)	R, mm	A_y , cm ²	$A_{k,y}$, cm ²	$A_{k,x}$, cm ²	g, kg/m	I_{xx} , cm ⁴	W_{xx} , cm ³	I_{yy} , cm ⁴	W_{yy} , cm ³	e, mm	E_0 , MPa
U 120 x 50 x 6 / 6	7.5	12.7	6.5	5.1	2.29	265	44.1	27.9	7.63	13.5	23000
U 140 x 40 x 5 / 5	5	10.6	6.3	3.4	1.91	278	39.8	13.1	4.23	9.1	23000
U 160 x 48 x 8 / 8	8	19.5	11.5	6.5	3.51	657	82.1	33.8	9.38	12	28000
U 200 x 60 x 10 / 10	10	30.4	18.0	10.2	5.47	1600	160	82.5	18.3	15	28000
U 240 x 72 x 8 / 8	8	29.7	17.3	9.8	5.35	2330	194	123	22.1	16.5	28000
U 240 x 72 x 12 / 12	12	43.8	25.9	14.7	7.88	3320	277	171	31.7	18	28000
U 300 x 90 x 15 / 15	15	68.5	40.5	23.0	12.33	8120	541	418	61.9	22.4	28000
U 360 x 108 x 18 / 18	18	98.6	58.3	33.1	17.75	16800	935	867	107	26.9	28000
UL 160 x 48 x 8 / 5	8	14	7.2	6.53	2.52	566.4	70.8	29.9	8.934	14.6	28000
UL 200 x 60 x 8 / 5	8	17.5	9	8.16	3.15	1132	113.2	60.3	14.29	17.8	28000
UL 240 x 72 x 10 / 7	10	27.7	15.12	12.24	4.99	2493	207.7	131.6	25.69	20.8	28000
UL 300 x 90 x 12 / 8	12	44.3	21.6	18.36	7.97	5996	399.8	331.7	50.32	24.1	28000
UL 360 x 108 x 15 / 10	15	66.4	32.4	27.54	11.95	12890	716.3	712.7	90.27	29	28000

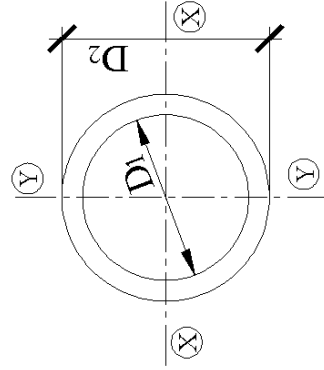
Firmas Fiberline Composites taisnstūrveida profilu sortiments



Apzīmējumi: H – profila augstums, B – profila platums, T – sienas biezums, R – liekuma rādiuss, A – šķēsgriezuma laukums, A_k – šķēsgriezuma bīdes laukums, g – lineārais blīvums, I – šķēsgriezuma inerces moments, W – šķēsgriezuma pretestības moments, E₀ – elastības modulis.

Nr. (H x B x T, mm)	R, mm	A, cm ²	A _{k,y} ² , cm ²	A _{k,x} ² , cm ²	A _{k,y} , cm ²	A _{k,x} , cm ²	I _x , cm ⁴	I _y , cm ⁴	W _x , cm ³	W _y , cm ³	E ₀ , MPa
50x50x5	2	9	4.5	4.5	1.62	1.62	31	31	12.4	12.4	23000
60x60x5	4	11.1	5.4	5.4	2.00	2.00	57	57	18.9	18.9	23000
80x60x5	4	13.1	7.2	5.4	2.36	1.62	115	72	28.7	24.0	23000
100x60x8	4	23.2	14.4	8.6	4.18	2.56	285	121	57	40.3	23000
100x100x6	4	22.7	10.8	10.8	4.09	4.09	336	336	67.2	67.2	23000
100x100x8	4	29.6	14.4	14.4	5.33	5.33	421	421	84.2	84.2	23000
120x120x6	4	27.5	13	13	4.95	4.95	598	598	99.7	99.7	23000
120x120x8	4	36	17.3	17.3	6.48	6.48	757	757	126	126	23000
160x160x8	8	49.2	23	23	8.86	8.86	1910	1910	238	238	23000
200x200x10	10	76.9	36	36	13.84	13.84	4650	4650	465	465	23000
240x240x12	12	111	51.8	51.8	19.98	19.98	9650	9650	804	804	23000

Firmas Fiberline Composites apaļu cauruļu sortiments



Apzīmējumi: D₁ – iekšējais diametrs, D₂ – ārējais diametrs, A – šķēsgriezuma laukums, A_k – šķēsgriezuma bīdes laukums, g – lineārais blīvums, I – šķēsgriezuma inerces moments, W – šķēsgriezuma pretestības moments, E₀ – elastības modulis.

Nr. (D ₂ / D ₁ , mm)	A, cm ²	A _k , cm ²	g, kg/m	I, cm ⁴	W, cm ³	E ₀ , MPa
Ø 75 / 65	11	5.5	1.98	68	18.1	23000
Ø 90 / 80	13.4	6.68	2.41	121	26.9	23000

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Fiberline Composites A/S. Design Manual. – Middelfart: Fiberline Composites A/S, 2002. – 326 p.
2. Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Rational Structure of Composite Trussed Beam. The 16th International Conference “Mechanics of composite materials, May 24-28, 2010. – Rīga: Institute of Polymer Mechanics, 2010, p. 75.
3. Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Rational Large Span Structure of Pultrusion Composite Trussed Beam. Scientific Proceedings of Riga Technical University. Construction Science. Vol.10. – Rīga: RTU, 2010
4. Lavendelis E. Materiālu pretestība. – Rīga: Zvaigzne, 1986.
5. EN 1990: 2002. Eurocode – Basis of structural design.
6. EN 1991-1-1:2002. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings.
7. UlpeJ., KupčeL. Koka un plastmasu konstrukcijas. – Rīga: Zvaigzne, 1991. – 304 lpp.
8. Strongwell Design Manual: Strongwell Corporation, [Electronical Resource] – <http://www.strongwell.com/designmanual/viewer.aspx> – resource described on May 30, 2010.
9. Exel Structural Profiles: Exel Composites. [Electronical Resource] – <http://www.exelcomposites.com/English/Products/StructuralProfiles/tabid/7750/language/en-US/Default.aspx> – resource described on May 30, 2010.
10. The Pultex Pultrusion Design Manual: Creative Pultrusion, INC, [Electronical Resource] – <http://www.creativepultrusions.com/LitLibrary/designmanual/dmv4r6.pdf> – resource described on May 30, 2010.

SATURS

1. Ievads	3
2. Pultrūzijas profilu ražošanas raksturojums	3
3. Pultrūzijas profilu īpašības	4
4. Konstruktīvo elementu no pultrūzijas kompozītmateriāliem aprēķins	6
4.1. Stiepto elementu aprēķins	6
4.2. Spiesto elementu aprēķins	7
4.3. Spiesti liekto elementu aprēķins	9
4.4. Liekto elementu aprēķins	10
5. Aprēķina piemēri	14
5.1. Centriski spiestas kolonnas aprēķina piemērs	14
5.2. Spiesti liektas kolonnas aprēķina piemērs	20
5.3. Brīvi balstītas liektas sijas aprēķina piemērs	25
Pielikumi	29
Izmantotās literatūras saraksts	33

KONSTRUKTĪVO ELEMENTU NO PULTRUZIJAS KOMPOZĪTMATERIĀLIEM APRĒĶINS (aprēķinu pamatprincipi un piemēri)

Metodiskie norādījumi