

Směrnice

Obsah

Tato část se zabývá polyesterovými a vinylesterovými konstrukčními profily vyztuženými skleněnými vlákny. Profily splňují požadavky na kvalitu dle ČSN EN 13706. GDP KORAL s.r.o. může dodávat i výrobky jiných parametrů.

Výpočtová část obsahuje informace o profilech a materiálech a popisuje teoretický základ statického výpočtu. Uvádí se tu metoda pro návrh sloupů, příčně zatížených nosníků o jednom, dvou a třech podpěrách a šroubové spoje.

Oddíl dimenzování je doplněn příklady, v nichž jsou ilustrovány a navrženy sloupy, nosníky a řada spojů. Profilu vždy náleží samostatná stránka s datovými charakteristikami (s výpočtovými hodnotami). První stránka popisuje geometrii profilu, tahové a tlakové zatížení sloupu. Na druhé straně jsou pak hodnoty vyjadřující příčné zatížení nosníku o jednom, dvou a třech podporách. Části nosíků, které jsou vystaveny tlaku, se musí zabezpečit, aby se vyloučilo riziko vybočení. Všechny výpočty sloupů a nosíků jsou navrženy podle metody uvedené v Design manuálu.

Únosnosti stanovené níže jsou uvedeny na samostatné stránce pro každý profil.

Krajní mezní stav

Bezpečnost proti selhání v důsledku přetížení nebo nedostatečné stability je vyjádřena dílčími koeficienty předepsanými pro břemena a napětí.

Provozní mezní stav

Chování konstrukce během provozu je stanoveno.

Deformační hledisko

Nosníková konstrukce se typicky dimenzuje tak, aby maximální průhyb činil 1/400 až 1/200 rozpětí nosníků. Nejpravděpodobnější zatížení tvoří zpravidla kombinace stálého zatížení a části nahodilého zatížení, které pravděpodobně zatěžuje nosník stále.

Agresivní prostředí

Při použití v agresivním prostředí se musí stanovit, zda má kompozit vlastnosti, které brání nepřijatelně rychlé korozi. Souhrn najdete na straně 5.1.04. V případě nejasností vám naši technici rádi poradí.

Nehodové meze

Použijí se v případě, zjištění chování konstrukce za nepředvídatelných podmínek, jako je oheň nebo výbuch, a to na základě bodu lomu a aplikace mezních ukazatelů.

Meze jsou popsány v části 2, kde jsou uvedeny příslušné materiálové vlastnosti.

Symboly a indexy

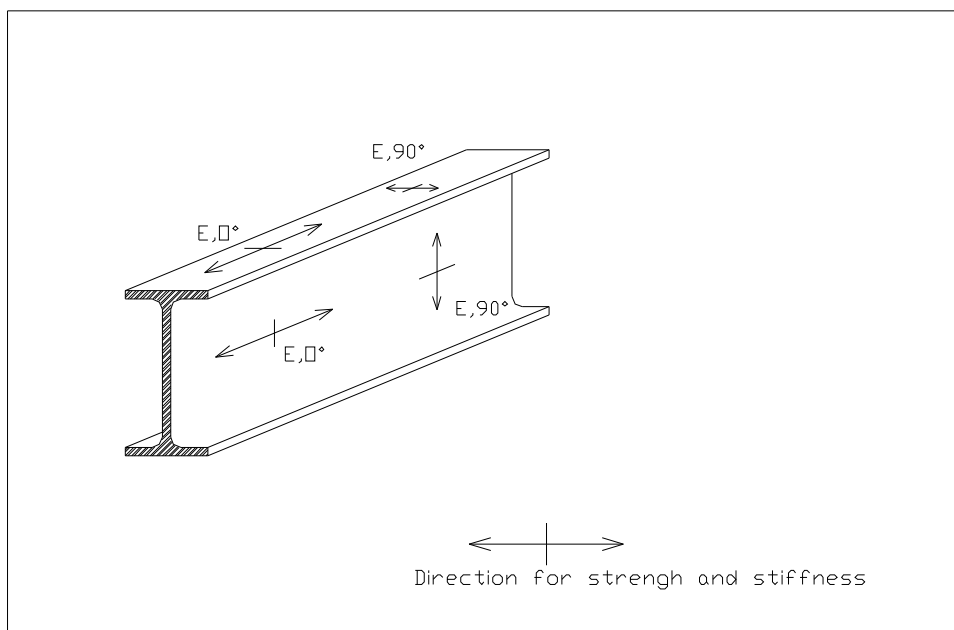
Symboly

A	plocha
a	vzdálenost osy šroubu od hrany laminátu ve směru působící síly
b	šířka
c	vzdálenost od osy šroubu k hraně laminátu kolmo ke směru působící síly
d	průměr
E	modul pružnosti
e	výstřednost, vzdálenost od těžiště
F	síla
f	napětí
G	modul ve smyku, trvalé břemeno
g	vlastní tíha na jednotku délky nebo plochy
H	výška
I	moment setrvačnosti
k	koeficient
L	délka, šířka rozpětí
M	moment
N	normálová síla
P	síla ve šroubu
p	zatížení na jednotku délky
q	nahodilé zatížení a jednotku délky
Q	nahodilé osamělé břemeno
r	poloměr
T	tloušťka
t	tloušťka
v	úhel
V	smyková síla
W	průřezový modul
<i>g</i>	dílčí koeficient
<i>d</i>	deformace, průhyb
<i>l</i>	štíhlost
<i>u</i>	Poissonovo číslo
<i>s</i>	normální napětí
<i>t</i>	smykové napětí

Indexy

0°	směr tažení při pultruzi (podélný směr)
90°	směr kolmý ke směru tažení (příčný směr)
b	ohyb
c	tlak
cr	kritický
d	návrhová hodnota
el	teoretická pružnost
k	charakteristická délka vybočení
r	relativní
t	tah
v	smyk, úhel
<i>t</i>	smyk

Hodnoty a definice



Obr. 5 - Označení směru pro napětí a tuhost.

Definice směru

Obr. 5 znázorňuje hlavní směry pro materiálové konstanty. 0° značí podélný směr profilu. Je to zároveň tahový směr při pultruzi a stejně tak směr běžně používaný pro vybočení nosníků a sloupů. Směr kolmý k podélnému směru profilu se vyznačuje jako 90° . Materiálové konstanty pro tento směr se používají převážně u spojů.

Jediné materiálové konstanty označené jako nezávislé na směru jsou smyková napětí a smykový modul. Teoreticky jsou závislé na směru, ale rozdíly jsou prakticky nepatrné, proto se užívá nejnižší naměřená hodnota.

Všechny uvedené hodnoty se získávají z měření uskutečněných v rámci skupiny GDP nebo v nezávislých zkušebních institucích. Všechna měření se provádějí podle stanovených standardů.

Jednotlivé směry jsou vyznačeny na obr. 5.

Statické výpočty

Statické výpočty kompozitních profilů jsou obvykle založeny na národně či mezinárodně uznávaných pravidlech a standardech.

Deformační meze

Statické výpočty kompozitních konstrukcí jsou stanovením chování konstrukce v rozmezí deformačních mezí. Tyto přetvární meze jsou dány oficiálními předpisy atd. nebo požadavky stavebního průmyslu na využití konstrukce, např. tuhosti při podpírání stroje.

Na straně 21 jsou popsány druhy zatížení, která se obvykle berou v úvahu při projektování podpěrné konstrukce.

Nejvyšší mez pevnosti

Tato mez zajišťuje konstrukci proti porušení vlivem přetížení nebo nedostatku stability zavedením dílčích koeficientů pro zatížení a napětí.

Účinek vnějších vlivů obvykle označený jako výpočtové napětí S_d musí být menší než návrhová pevnost R_d .

Pro každé statisticky nezávislé zatížení se stanoví výpočtové napětí S_d v rozhodujících zkušebních bodech konstrukce na základě stálých a nahodilých zatížení.

Pro systém s jedním nahodilým zatížením se výpočtové napětí S_d stanoví pomocí rovnice:

$$S_{d,k} = \sum_{j=1,\dots,m} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + 1,50 \cdot Q_k$$

kde

$G_{k,j}$: je stálé aktivní zatížení (od stálého zatížení čís. j ve zkušebním bodě čís. k)

Q_k : nahodilé zatížení (ve zkušebním bodě čís. k)

$\gamma_{G,j}$: dílčí koeficient stálého zatížení (čís. j)

Hodnota $\gamma_{G,j}$ je 1,35. Avšak hodnota $\gamma_{G,j}$ je jen 1,0 v případech, kdy stálé zatížení zvětšuje stabilitu.

Pro systémy s několika nahodilými zatíženími se účinek každého zatížení stanoví zvlášť podle rovnice:

$$S_{d,k,i} = \sum_{j=1,\dots,m} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + 1,50 \cdot Q_{k,i}$$

kde

$G_{k,j}$: je stálé aktivní zatížení (od stálého zatížení čís. j ve zkušebním bodě čís. k)

$Q_{k,i}$: nahodilé zatížení (čís. i ve zkušebním bodě čís. k)

$\gamma_{G,j}$: dílčí koeficient stálého zatížení (čís. j)

Hodnota $\gamma_{G,j}$ je 1,35. Avšak hodnota $\gamma_{G,j}$ je jen 1,0 v případech, kdy stálé zatížení zvětšuje stabilitu.

V ostatních případech, jako je kombinované zatížení, se stanoví takto:

$$S_{d,k} = \sum_{j=1,\dots,m} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + 1,35 \cdot \sum_{j=1,\dots,n} Q_{k,i}$$

Největší hodnota faktoru S_d pro kombinované napětí uvedené výše je označována jako vypočítaná (teoretická) hodnota.

Musí být menší než vypočítaný odpor, který je dán zkouškami nebo návrhové pevnosti R vyjádřené vzorci:

$$R_d = R_k / \gamma_m$$

$$\frac{R_d}{\gamma_m} = \frac{R_k}{\gamma_{m,1} \cdot \gamma_{m,2} \cdot \gamma_{m,3} \cdot \gamma_{m,4}}$$

kde dílčí koeficienty $\gamma_{m,1}$, $\gamma_{m,2}$, $\gamma_{m,3}$ a $\gamma_{m,4}$ popisují následující vliv

$\gamma_{m,1}$: výrobní způsob

$\gamma_{m,2}$: stupeň závěrečného šetření

$\gamma_{m,3}$: jistota rozměrové stability, rozdíl mezi provozní teplotou a HDT (teplotní deformace)

$\gamma_{m,4}$: provozní teplota

Dílčí koeficienty $\gamma_{m,1}$, $\gamma_{m,2}$ a $\gamma_{m,3}$ byly stanoveny na základě EUROCOMP Design Code.

$\gamma_{m,1} = 1,15$ GDP KORAL s.r.o. profily se pultrudují

$\gamma_{m,2} = 1,1$ GDP KORAL s.r.o. profily se úplně ošetří v dílně

$\gamma_{m,3} = 1,0$ GDP KORAL s.r.o. profily mají pro rozměrovou stabilitu nejvyšší teplotu HDT 100°C

Dílčí koeficient $\gamma_{m,4}$ popisuje pevnost a tuhost pultrudovaného profilu v závislosti na provozní teplotě.

GDP KORAL s. r. o. doporučuje, aby se koeficient stanovil tak, jak je uvedeno v tab. 1.

Provozní teplota (°C) za sucha	$\gamma_{m,4}$	
	Krátkodobé zatížení	Dlouhodobé zatížení
-20	1,0	2,5
0	1,0	2,5
20	1,0	2,5
40	1,0	2,5
60	1,0	2,5
80	1,25	3,13

Tabulka 1a

Pro hodnoty neuvedené v tabulce, se $\gamma_{m,4}$ stanoví interpolací.

Zatěžovací doba dlouhodobého zatížení se uvažuje v rocích.

Celkový koeficient γ_m je uveden v následující tabulce.

Pro hodnoty neuvedené v tabulce se γ_m stanoví interpolací.

Rozměry kompozitní konstrukce se často stanoví s ohledem na provozní podmínky. Pokud odpovědná osoba považuje budoucí riziko porušení konstrukce za významné nebo naopak nevýznamné, může koeficienty uvedené níže zvýšit nebo snížit.

Provozní teplota (°C) za sucha	$\gamma_m = \gamma_{m,1} \gamma_{m,2} \gamma_{m,3} \gamma_{m,4}$	
	Krátkodobé zatížení	Dlouhodobé zatížení
-20	1,3	3,2
60 (80)	1,3	3,2
80 (100)	1,6	4,0

Tabulka 1b - Hodnoty v závorkách platí pro profily z vinylesteru.

Deformační meze v praxi

Jde o zhodnocení chování konstrukce, zvláště jejího přetvoření. Je typické, že nosníková konstrukce se dimenzuje tak, aby maximální průhyb byl mezi $L/400$ a $L/200$, kde L je rozpětí nosníku.

V rozhodujících zkušebních bodech se porovnává dopad, kterým je v těchto analýzách zpravidla deformace, s přípustnou mezní deformací.

Při stanovení těchto koeficientů by se měl brát ohled na skutečnost, že všechna nahodilá zatížení se nemusí vyskytovat najednou.

EUROCOMP Design Code navrhuje použití níže uvedených vzorců při testování mezí deformací konstrukcí za provozu.

Stálé zatížení a jedno nahodilé zatížení.

$$R_{k,i} \geq S_{k,i}$$

$$S_{k,i} = \sum_{j=1, \dots, m} G_{k,j} + Q_{k,i}$$

Pro faktor současného působení stanovený v EUROCOMP, jehož hodnota je 0,9, stanoví část 1 Eurocode hodnoty, které dávají možnosti reálnějšího stanovení současného vlivu různých vlivů zatížení. Na základě rozhodnutí inženýra bude také často možno redukovat faktor současného působení na hodnotu menší než 0,9.

$$R_{k,i} \geq S_{k,i}$$

$$S_k = \sum_{j=1, \dots, m} G_{k,j} + 0,90 \cdot \sum_{j=1, \dots, n} Q_{k,i}$$

Zatížení ohněm

Při posuzování odolnosti nosné konstrukce proti působení ohně se předpokládá, že konstrukce bude zatížena nejvíce pravděpodobným typem namáhání.

Teplotní důsledky se mohou stanovit podle Eurocode 1, část 2-2 (DS/ENV 1991-2-2).

Meze přetvoření za nehody

Chování konstrukce za neočekávaných podmínek, jako je oheň, náraz nebo exploze se může vyhodnotit na základě koeficientů pro nejvyšší meze přetvoření a meze přetvoření za provozu.

Pro tato mezní přetvoření se obvykle používají typické hodnoty, tj. hodnoty co nejreálnější.

Výpočty v zásadě sledují průběh mezního přetvoření, kdy všechny dílčí koeficienty mají hodnotu 1. Nahodilému zatížení se přisoudí velikosti odpovídající nejpravděpodobnějšímu zatížení.

Vlastnosti materiálů

Hodnoty materiálů uvedené v této části platí při teplotním rozsahu od -20°C do 60°C .

Pro teploty nad 60°C se musí pevnost a tuhost redukovat koeficientem $\gamma_{m,4}$, jak je uvedeno na předchozí straně.

Typické pevnostní hodnoty (za sucha)		
		[MPa]
Ohybová pevnost, 0°	$f_{b,0^{\circ}}$	240
Ohybová pevnost, 90°	$f_{b,90^{\circ}}$	100
Tahová pevnost, 0°	$f_{t,0^{\circ}}$	240
Tahová pevnost, 90°	$f_{t,90^{\circ}}$	50
Tlaková pevnost, 0°	$f_{c,0^{\circ}}$	240
Tlaková pevnost, 90°	$f_{c,90^{\circ}}$	70
Smyková pevnost	f_{τ}	25
Stříhová pevnost při uchycení čepem, podélný směr	$f_{cB,0^{\circ}}$	150
Stříhová pevnost při uchycení čepem, příčný směr	$f_{cB,90^{\circ}}$	70

Tabulka 2

Tato tabulka je založena na výsledcích testů. Uvedené hodnoty mohou tvořit základ pro výpočet detailů spojení a místních faktorů profilů. Z těchto údajů mohou vycházet výpočty nosníků a sloupů pro posouzení stability a možných dlouhodobých napěťových vlivů.

V mnoha případech se může posouzení nosníkových konstrukcí založit na zjednodušených výpočtech, které vycházejí ze vzorce pro podélný směr (0°). U tohoto způsobu výpočtu se mohou zanedbat zkoušky místní stability přírub a může být zanedbáno dotvarování profilů. Zjednodušené výpočty nosníků jsou popsány na následující straně.

Typické hodnoty tuhosti a příčné smrštění (za sucha)			
		[MPa]	[--]
Modul pružnosti	E_{0°	23 000 / 28 000	
Modul pružnosti	E_{90°	8 500	
Modul smyku	G	3 000	
Poissonovo číslo	$\nu_{0^\circ,90^\circ}$		0,23
Poissonovo číslo	$\nu_{90^\circ,0^\circ}$		0,09

Tabulka 3

E-modul profilů se mění v rozsahu 23 až 28 GPa v závislosti na tvaru a vyztužení. Viz rozhodující hodnoty v části zabývající se zatížitelností jednotlivých profilů.

Pevnostní hodnoty pro výpočty			
		Krátkodobá hodnota [MPa]	Dlouhodobá hodnota [MPa]
Ohybová pevnost, 0°	$f_{b,0^\circ,d}$	185	75
Ohybová pevnost, 90°	$f_{b,90^\circ,d}$	75	30
Tahová pevnost, 0°	$f_{t,0^\circ,d}$	185	75
Tahová pevnost, 90°	$f_{t,90^\circ,d}$	40	30
Tlaková pevnost, 0°	$f_{c,0^\circ,d}$	185	75
Tlaková pevnost, 90°	$f_{c,90^\circ,d}$	75	30
Smyková pevnost	$f_{t,d}$	20	8

Tabulka 4

Výše uvedené hodnoty odpovídají údajům v tabulce 2. děleným koeficientem $\gamma_m = 1,3$. V následující kapitole jsou uvedeny zjednodušené výpočty nosníků. U dlouhodobého zatížení je doba zatížení uvažována v rocích.

Zjednodušený výpočet nosníkových konstrukcí

Výpočty nosníkových konstrukcí se mohou zjednodušit, jestliže hodnota ohybového napětí je nižší než hodnota deformace uvedená níže. Posouzení stability a dlouhodobého napětí může být vynecháno.

Vypočtené deformační meze pro tah, pokud se mohou zanedbat zkoušky dlouhodobých příčinků a stanovení místní stability přírub		
		[MPa]
Ohybová pevnost, 0°	$f_{b,0^\circ,d}$	75

Tabulka 5

Jestliže se nosníky dimenzují podle běžných deformačních mezí, výpočet mezního stavu bude jen zřídka rozhodujícím návrhovým kritériem.

Zatížení

Príspevky stálého zatížení ve zkušebním bodu p

$G_{1,p}$ (se stabilizačním účinkem na bod p)

$G_{2,p}$ (s destabilizačním účinkem na bod p)

Príspevky statisticky nezávislého náhodného zatížení na zkušební bod p

$Q_{1,p}$ (obvyklá hodnota zatížení z kombinace zatížení a mezní deformace je $> L_1 \cdot Q_{1,p}$)

$Q_{2,p}$ (obvyklá hodnota zatížení z kombinace zatížení a mezní deformace je $> L_2 \cdot Q_{2,p}$)

$Q_{3,p}$ (obvyklá hodnota zatížení z kombinace zatížení a mezní deformace je $> L_3 \cdot Q_{3,p}$)

Normální kombinace zatížení

Nejvyšší mezní stav

Obecně $S_{d,p}^{B1} \leq R_{d,p}$ kde $R_{d,p} = R_{k,p} / \gamma_m$

tedy:

$$B1,1 \quad S_{d,p}^{B1} = 1.0 G_{1,p} + 1.35 G_{2,p} + 1.50 Q_{1,p}$$

$$B1,2 \quad S_{d,p}^{B1} = 1.0 G_{1,p} + 1.35 G_{2,p} + 1.50 Q_{2,p}$$

$$B1,3 \quad S_{d,p}^{B1} = 1.0 G_{1,p} + 1.35 G_{2,p} + 1.50 Q_{3,p}$$

$$B2 \quad S_{d,p}^{B1} = 1.0 G_{1,p} + 1.35 G_{2,p} + 1.35 Q_{1,p} + 1.35 Q_{2,p} + 1.35 Q_{3,p}$$

kde $R_{d,p}$ je výpočtová pevnost, typicky mez deformace pro tahovou a lomovou sílu ve zkušebním bodě. $R_{d,p}$ je definována jako napěťová hodnota za charakteristických podmínek $R_{k,p}$ dělená koeficientem γ_m .

Výpočty odpovídají materiální pevnosti uvedené v tabulce 2. Pro nosníkové konstrukce je možné použít zjednodušené výpočty založené na výpočtové pevnosti uvedené v tabulce 5.

Meze za provozu

Deformační meze

Obecné úrovně přetvoření

$$S_{d,p}^{A1} \leq 1.0 G_{1,p} + 1.35 G_{2,p} + 1.50 Q_{3,p}$$
$$A1 \quad S_{d,p}^{A1} = G_{1,p} + G_{2,p} + >_{L,1} Q_{1,p} + >_{L,2} Q_{2,p} + >_{L,3} Q_{3,p}$$

kde $R_{A1,p}$ je přípustná provozní výpočtová pevnost – typická deformace / vychýlení ve zkušebním bodě p. Není třeba přidávat další koeficient k $R_{A1,p}$. Zatížení $S_{d,p}^{A1}$ odpovídá nejpravděpodobnějšímu zatížení uvedenému výše. Není-li k dispozici přesnější hodnota faktoru > doporučuje se použít hodnotu 0,9.

Maximální úroveň přetvoření

$$S_{K,p}^{A2,1} \leq R_{A2,p}$$
$$S_{K,p}^{A2,2} \leq R_{A2,p}$$
$$S_{K,p}^{A2,3} \leq R_{A2,p}$$
$$A2,1 \quad S_{K,p}^{A2,1} = G_{p,1} + G_{p,2} + 1.00 Q_{p,1} + >_{L,2} Q_{p,2} + >_{L,3} Q_{p,3}$$
$$A2,2 \quad S_{K,p}^{A2,2} = G_{p,1} + G_{p,2} + >_{L,1} Q_{p,1} + > 1.00 Q_{p,2} + >_{L,3} Q_{p,3}$$
$$A2,3 \quad S_{K,p}^{A2,3} = G_{p,1} + G_{p,2} + >_{L,1} Q_{p,1} + >_{L,2} Q_{p,2} + 1.00 Q_{p,3}$$

kde $R_{A2,p}$ je přípustná provozní výpočtová pevnost – typická deformace / vychýlení při krátkodobém zatížení ve zkušebním bodě p. Není-li k dispozici přesnější hodnota faktoru > doporučuje se použít hodnota 0,9.

Hodnota $R_{A2,p}$ je pro nosník s limitní deformací často volena jako určitý podíl rozpětí – obvykle mezi 1/200 až 1/400 – nebo na základě požadavku, minimální vzdálenost mezi prvky v konstrukci během provozu. Není třeba přidávat dílčí koeficient k $R_{A2,p}$ nebo k materiálové parametry (E a G).

..

Deformační meze pod vlivem ohně

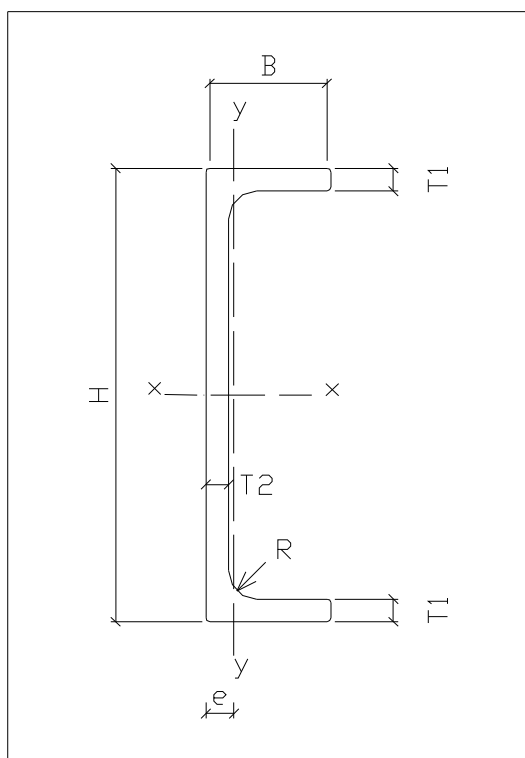
Pro vyhodnocení chování konstrukce v ohni je použito standardní zatížení ohněm, jako je uvedeno v Eurocode 1 (DS/ENV 1991-2-2).

Zatížení konstrukce je stanoveno jako zatížení nejvýše pravděpodobné. Není třeba přidávat dílčí koeficient k hodnotám pevnosti materiálu.

Meze přetvoření za nehody

Stanovení mezní deformace při nehodě obvykle závisí na specifikaci konstrukce. Použije se nejpravděpodobnější možné zatížení. Zpravidla není třeba přidat dílčí koeficient k hodnotám pevnosti materiálu

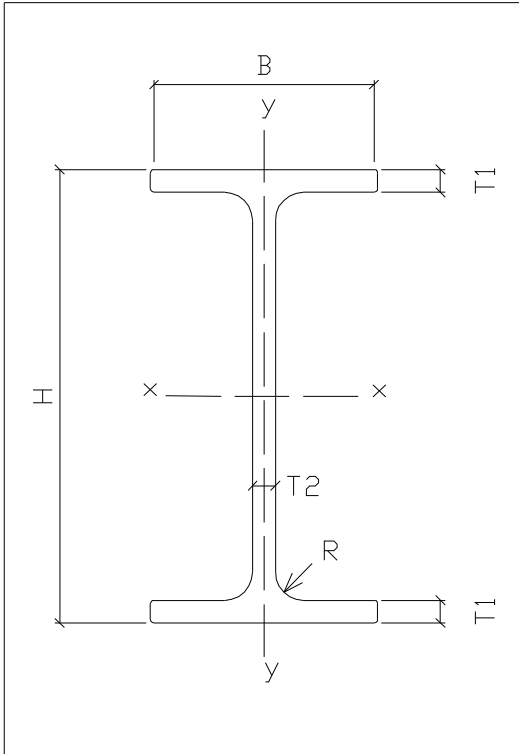
Profily – základní hodnoty



U profil

U profil	H mm x1	B mm x1	T1 mm x1	T2 mm x1	R mm x1	A mm ² x10.3	m kg x1	I _x mm ⁴ x10.6	W _x mm ³ x10.3	I _y mm ⁴ x10.6	W _y mm ³ x10.3	e mm x1	E MPa x10.3
U 70x38x3	70	38	3	3	4	0,426	0,780	0,327	9,343	0,059	3,105	10,84	23
U 90x30x8	90	30	8	8	6	1,108	1,980	1,125	25	0,074	4,933	9,11	23
U 120x60x7	120	60	7	7	7,5	1,605	2,930	3,439	57,32	0,532	17,73	17,42	23
U 150x60x8	150	60	8	8	7,5	2,106	3,760	6,764	90,19	0,662	22,07	16,62	23
U 200x60x8	200	60	8	8	7,5	2,506	4,636	13,61	136,1	0,718	23,93	14,61	23

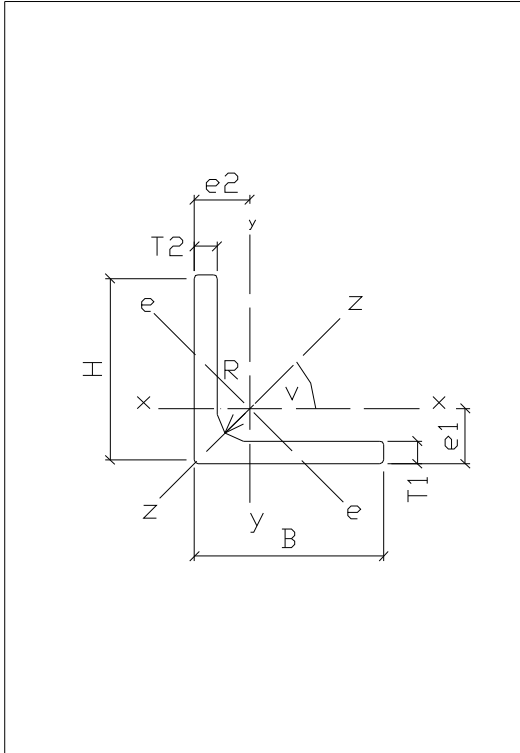
Profily – základní hodnoty



I profil

I profil	H mm x1	B mm x1	T1 mm x1	T2 mm x1	R mm x1	A mm ² x10.3	m kg x1	I _x mm ⁴ x10.6	W _x mm ³ x10.3	I _y mm ⁴ x10.6	W _y mm ³ x10.3	E MPa x10.3
I 120x60x8	120	60	8	8	6	1,855	3,320	4,16	69,33	0,294	9,8	23
I 200x100x12	200	100	12	12	7	4,552	8,350	26,99	269,9	2,024	40,48	23
I 343x100x12	343	100	12	12	7	6,268	11,52	99,23	578,6	2,044	40,88	23

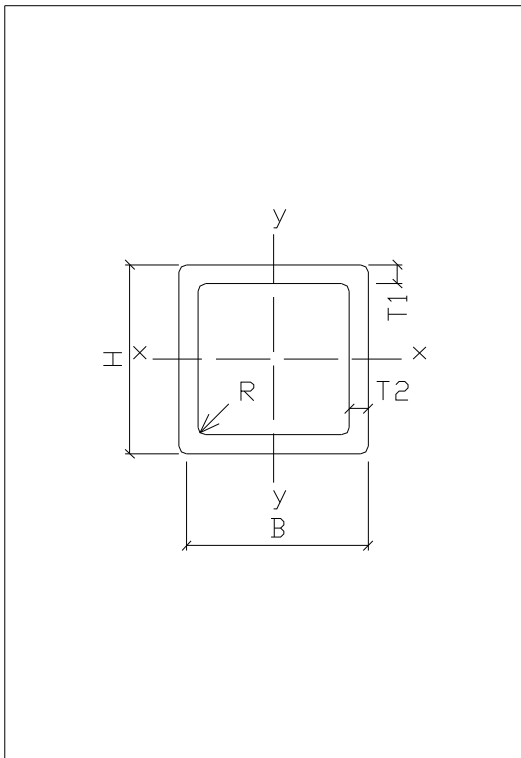
Profily – základní hodnoty



L profil

L profil	H mm x1	B mm x1	T1 mm x1	T2 mm x1	R mm x1	A mm ² x10.3	m kg x1	I _x mm ⁴ x10.6	W _x mm ³ x10.3	I _z mm ⁴ x10.6	e1 mm x1	e2 mm x1	E MPa x10.3
L 30x30x3	30	30	3	3	3,5	0,173	0,320	0,006	0,672	0,023	21,07	21,07	23
L 60x60x6	60	60	6	6	7	0,693	1,270	0,097	2,258	0,37	17,05	17,05	23
L 70x70x10	70	70	10	10	7	1,309	2,410	0,244	3,968	0,919	8,51	8,51	23

Profily – základní hodnoty



Trubka čtvercová

Trubka čtvercová	H mm x1	B mm x1	T1 mm x1	T2 mm x1	R mm x1	A mm ² x10.3	m kg x1	I _x mm ⁴ x10.6	W _x mm ³ x10.3	I _y mm ⁴ x10.6	W _y mm ³ x10.3	E MPa x10.3
50x50x5	50	50	5	5	2	0,9	1,670	0,307	12,28	0,307	122,8	23

Profily vystavené tahu a tlaku (sloupy a tažené tyče)

L_k	vzpěrná délka sloupu
A	plocha příčného řezu
I	moment setrvačnosti
N_d	návrhová hodnota normálové síly (obsahující dílčí koeficient)
$f_{c,0^\circ} / f_{t,0^\circ}$	charakteristické tlakové/ tahové napětí (bez dílčího koeficientu)
E_0	charakteristický modul pružnosti (včetně dílčího koeficientu)
$\gamma_{m,f}$	dílčí koeficient pro $f_c, 0^\circ / f_t, 0^\circ$ za nejvyššího mezního stavu
$\gamma_{m,E}$	dílčí koeficient pro E za nejvyššího mezního stavu
N_{cr}	kritické zatížení sloupu
N_{el}	zatížení za pružného stavu (Eulerovo zatížení)
F_d	tlakové zatížení

Profily vystavené tahu

Maximálně dovolené zatížení N_d se stanoví na základě charakteristického napětí v profilu a příčného řezu v profilu.

$$N_d \leq A \cdot f_{t,0^\circ} / \gamma_{m,f}$$

Profily vystavené tlaku

Návrhová hodnota normálové síly N_d musí být menší než kritické zatížení sloupu N_{cr} . Hodnota kritického zatížení sloupu závisí na jeho délce. Dimenzujícím faktorem pro krátké sloupy je kritické tlakové napětí. Delší sloupy se dimenzují podle Eulerova zatížení podle následujícího vzorce

$$N_d \leq N_{cr} = F_d / (1 + F_d / N_{el}) = F_d / (1 + \lambda_{cr}^2)$$

kde

$$\lambda_{cr} = \sqrt{f_{c,0^\circ} / (\sigma_{el} \cdot \gamma_{m,f})}$$

$$F_d = A \cdot f_{c,0^\circ} / \gamma_{m,f}$$

$$N_{el} = \pi^2 \cdot E_0 \cdot I / (\gamma_{m,E} \cdot L_k^2)$$

$$\sigma_{el} = N_{el} / A$$

Jestliže je splněno $N_d < N_{cr}$, sloup vyhoví.

Příklad 2.1: Sloup

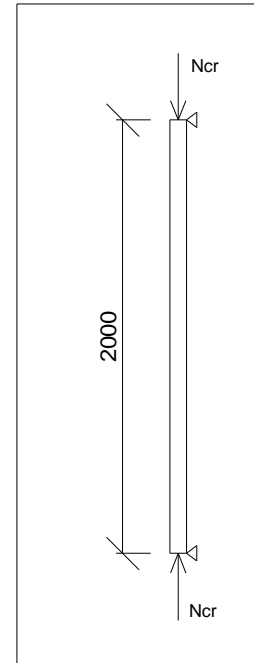
Čtvercové trubky 50x50x5 se používají jako sloupy zábradlí. Často se mohou často používat pro ploštinové konstrukce jako nosné podpěrné sloupy.

Následující příklad ukazuje, jak se určí únosnost 2 m čtvercové trubky. Výpočet je založen na předpokladu, že profil je prostě podepřen. Vzpěrná délka se tedy rovná délce sloupu. Viz obr. 3.1

$$\begin{aligned}
 A &= 0,903 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 \\
 I_{xx} &= 0,309 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \\
 I_{yy} &= 0,309 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \\
 E_{0^\circ} &= 23\,000 \text{ MPa} \\
 f_{c,0} &= 240 \text{ MPa} \\
 \gamma_{m,E} &= 1,3 \\
 \gamma_{m,f} &= 1,3 \\
 L_K &= 2000 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Výpočet je nutno provést podle postupu daného teorií vzpěru. Kritické tlakové zatížení se pak vypočte:

$$F_d = A \cdot f_{c,0^\circ} / \gamma_{m,f} = (0,903 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 \cdot 240 \text{ MPa} / 1,3) \cdot 10^{-3} = 166,7$$



Kritické Eulerovo zatížení se vypočte stejným způsobem:

$$\begin{aligned}
 N_{el} &= \pi^2 \cdot E_{0^\circ} \cdot I / (\gamma_{m,E} \cdot L_k^2) \\
 &= (\pi^2 \cdot 23\,000 \text{ MPa} \cdot 0,309 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 / 1,3 \cdot (2000 \text{ mm})^2) \cdot 10^{-3} \quad \text{Obr. 6} \\
 &= 13,49 \text{ KN}
 \end{aligned}$$

Eulerovo zatížení je dimenzačním faktorem. Kritické zatížení sloupu se vypočte takto:

$$N_{cr} = F_d / (1 + F_d / N_{el}) = 166,7 \text{ KN} / (1 + 166,7 \text{ KN} / 13,49 \text{ KN}) = 12,48 \text{ KN}$$

Jestliže se toto zatížení nepřestoupí, profil o délce dvou metrů vyhoví.

Příklad 2.2: Profily v příhradovém sloupu

Stanovení únosnosti sloupu (část příhradového sloupu; viz obr. 7). Sloup je jednoduše podepřen.

vzpěrná délka $L_x = 3,60$ m (vyboulení v „pevném“ směru)

vzpěrná délka $L_y = 0,90$ m (vyboulení v „měkkém“ směru)

dílčí koeficient pro E_0 $\gamma_{m,E} = 1$

dílčí koeficient pro $f_{c,0}$ $\gamma_{m,f} = 1,3$

zatížení:

vlastní tíha včetně profilu $G = 20$ KN

užitečné zatížení $Q_1 = 100$ KN

dílčí koeficient, vlastní tíha $\gamma_{f,g} = 1,35$

dílčí koeficient, užitečné zatížení $\gamma_{f,g} = 1,5$

Zvolený profil: 1200x100x10

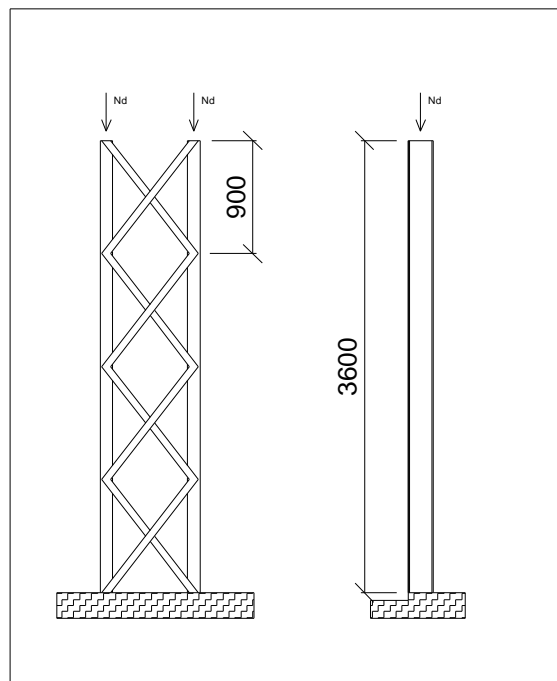
$$A = 3,89 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$$I_{xx} = 23,6 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$I_{yy} = 1,69 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

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

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



Obr. 7

Hlavní mezní stav:

$$N_d = \gamma_{fg} \cdot G + \gamma_f \cdot Q_1 = 1,35 \cdot 20 + 1,5 \cdot 100 = 177,0 \text{ KN}$$

$$F_d = A \cdot f_{c,0^\circ} / \gamma_{m,f} = (3,89 \cdot 10^3 \cdot 240 / 1,3) \cdot 10^{-3} = 718,2 \text{ KN}$$

$$N_{el,x} = \pi^2 \cdot E_{0^\circ} \cdot I_{xx} / (\gamma_{m,E} \cdot L_x^2) = (\pi^2 \cdot 28\,000 \cdot 23,6 \cdot 10^6 / (1,3 \cdot 3600^2)) \cdot 10^{-3} = 387,1 \text{ KN}$$

$$N_{cr,x} = F_d / (1 + F_d / N_{el,x}) = 718,2 \text{ KN} / (1 + 718,2 \text{ KN} / 387,1 \text{ KN}) = 251,5 \text{ KN}$$

Protože $N_{cr,x}$ je větší než N_d ($251,5 > 177,0$ kN), sloup v tomto směru vyhoví.

Podobný výpočet se dá uskutečnit také v druhém „slabém směru“

$$N_{el,y} = \pi^2 \cdot E_{0^\circ} \cdot I_{yy} / (\gamma_{m,E} \cdot L_y^2) = (\pi^2 \cdot 28\,000 \cdot 1,69 \cdot 10^6 / (1,3 \cdot 900^2)) \cdot 10^{-3} = 443,5 \text{ KN}$$

$$N_{cr,y} = F_d / (1 + F_d / N_{el,y}) = 718,2 \text{ KN} / (1 + 718,2 \text{ KN} / 443,5 \text{ KN}) = 274,2 \text{ KN}$$

Protože také $N_{cr,y}$ je větší než N_d , sloup vyhoví i v tomto směru.

Profily zatížené tlakovou silou a ohybovým momentem

Když je sloup vystaven současně normálové síle a ohybovému momentu může se únosnost stanovit dle níže uvedeného.

Vyhodnocení se musí provést za nejvyššího mezního stavu.

Normálová tlaková síla a ohybový moment jsou vzájemně závislé, protože příčný průhyb ve spojení s normálovou silou vyvolává moment v profilu (uvolnění průhybu).

Zjednodušený výpočet se provede vynásobením momentu (aniž se bere v úvahu průhyb od ohybového momentu) momentovým „nárůstovým“ činitelem.

Síly v příčném směru (návrhové momenty)

N_d : normálová tlaková síla

M_d : ohybový moment (stanovený bez respektování deformace)

Konstanty v příčném směru

A : plocha příčného řezu profilu

W : průřezový modul profilu

Hodnoty příčného řezu jsou uvedeny na datových stránkách profilů.

Napětové posouzení

Maximální tlakové napětí v profilu je:

$$\sigma_{\max} < f_{c,0} / \gamma_{m,f}$$

$$\sigma_{\max} = (N_d / A) + (1 / (1 - N_d / N_{cr})) \cdot (M_d / W)$$

kde

$f_{c,0} / \gamma_{m,f}$ = návrhová hodnota pro tlakové napětí profilu

N_{cr} = kritická tlaková síla profilu (viz datové stránky)

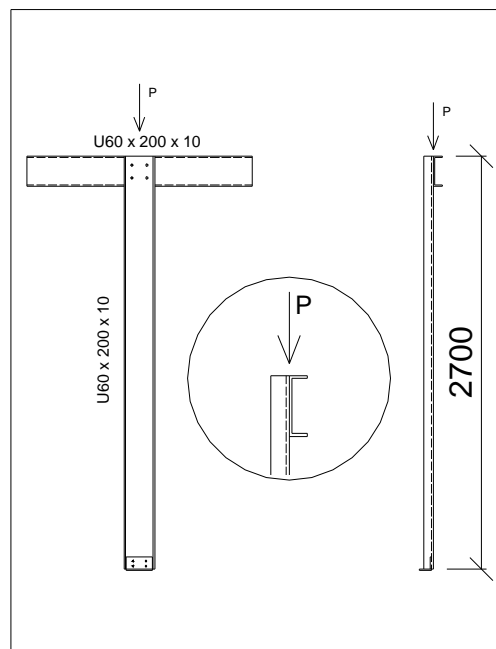
Příklad 2.3: Sloup vystavený osové síle a momentu

Obr. 8 představuje U profil 200x60x10 použitý jako nosný sloup v konstrukci. U profil je vystaven normálové síle ($P = 20\text{kN}$) a rovněž ohybovému momentu, který vzniká působením normálové síly v jakékoliv vzdálenosti od těžišťové osy U profilu.

Podle údajů datové stránky kritická normálová síla neboli zatížení nosníku činí 23,2 kM. Dvě spojení konstrukce jsou vystaveny síle 24,8 kN (horní spojení) a 20,0 kN (spodní spojení).

Vzhledem k tomu, že se zatížení sloupu přenáší smykovou silou mezi spojeními, velikost momentu se dá stanovit použitím momentového „nárůstového“ činitele. Sloup se následně může dimenzovat. V první řadě se stanoví vzdálenost mezi působištem síly k těžišťové ose podle tabulky na straně 22.

Velikost momentu se rovná vzdálenosti působištem síly k těžišťové ose násobené normálovou silou, tj. $N_d \cdot e_x$. Normálový napěťový činitel ve sloupu se stanoví takto:



Obr. 8

$$P = N_d$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= (N_d / A) + (1 / (1 - N_d / N_{cr})) \cdot (N_d \cdot e_x / W_{yy}) \\ &= (20,0 \cdot 10^3 / 3,04 \cdot 10^3) + (1 / (1 - 20,0 \cdot 10^3 / 23,5 \cdot 10^3)) \cdot (20,0 \cdot 10^3 \cdot 15,0 / 18,3 \cdot 10^3) \\ &= 6,6 + (6,71 \cdot 16,4) \\ &= 117 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$f_{c,0^\circ} / \gamma_{m,f} = 240 \text{ MPa} / 1,3 = 185 \text{ MPa}$$

Protože $117 < 185 \text{ MPa}$, napětí nevyvolá kritické podmínky ve sloupu

Podobně průhyb se dá stanovit pomocí vzorce uvedeného níže, za předpokladu, že sloup je prostě podepřen na obou koncích a že je vystaven stále stejnému momentu, aniž se vezme v úvahu vliv normálové síly.

$$\sigma_{\text{moment}} = (M_0 \cdot l^2) / (8 \cdot E_0 \cdot I_{yy})$$

Hodnota průhybu se musí také násobit momentovým „nerůstovým“ koeficientem.

$$\sigma_{\text{total}} = (1 / (1 - N_d / N_{cr})) \cdot (N \cdot e_x \cdot l^2 / 8 \cdot E_0 \cdot I_{yy})$$

$$\sigma_{\text{total}} = (1 / (1 - 20,0 \cdot 10^3 / 23,2 \cdot 10^3)) \cdot (20,0 \cdot 10^3 \cdot 14,9 \cdot 2000^2 / 8 \cdot 28000 \cdot 0,825 \cdot 10^6)$$

$$\sigma_{\text{total}} = 7,25 \cdot 6,5$$

$$\sigma_{\text{total}} = 47,1 \text{ mm}$$

Příklad naznačuje, že i malá excentricita může mít významný vliv na napětí a deformace. Proto se doporučuje, aby zatížení byla aplikována na nosník centrálně tj. síly do středu sloupu. Tak bude konstrukcím dána dostatečně velká momentová kapacita.

Příčně zatížený nosník

Výpočtová metoda pro prostě podepřený nosník na obou koncích.

- L : Délka rozpětí (mezi podporami)
A_k : Smyková plocha
W : Průřezový modul
I : Moment setrvačnosti
Q_k : Příčné zatížení používané při stanovení průhybu (často charakteristická hodnota největšího působícího zatížení)
P_d : Celkové příčné zatížení včetně dílčích koeficientů
k_M : Koeficient vyjadřující maximální moment
k_V : Koeficient vyjadřující maximální smykovou sílu
k_{δM} : Koeficient vyjadřující maximální průhyb od ohybového momentu
k_{δV} : Koeficient vyjadřující maximální průhyb od smykové síly
f_{b,0°} : Charakteristické průhybové napětí bez dílčího koeficientu
f_τ : Charakteristické smykové napětí (bez dílčího koeficientu)
E : Charakteristický E-modul (bez dílčího koeficientu)
G : Charakteristický smykový modul (bez dílčího koeficientu)
γ_{m,f} : Dílčí koeficient pro f_{b,1} a f_τ za maximálního mezního stavu
δ : Průhyb

Maximální mezní stav

$$\text{Ohyb: } k_M \cdot p_d \cdot L^2 / W \leq f_{b,0^\circ} / \gamma_{m,f}$$

$$\text{Smyk: } k_V \cdot p_d \cdot L / A_k \leq f_\tau / \gamma_{m,f}$$

Provozní mezní stav

Mez průhybu:

$$\text{Max } \delta / L < 1 / \alpha$$

$$\text{Max } \delta / L = k_{\delta M} \cdot q_k \cdot L^3 / E_{0^\circ} \cdot I + k_{\delta V} \cdot q_k \cdot L / G \cdot A_k$$

Hodnota α se volí mezi 200 a 400.

$$\text{Ohyb: } k_M \cdot q_k \cdot L^2 / W < f_{b,0^\circ,d} \quad (\delta_{b,0^\circ} \text{ z tabulky 2.3})$$

$$\text{Smyk: } k_V \cdot p_d \cdot L / A_k < f_{\tau,d} \quad (\tau \text{ z tabulky 2.3})$$

Dvě napěťové hodnoty $\sigma_{b,0^\circ}$ a τ jsou uvedeny v tab. 4, která je rozdělena do dvou kategorií. Stupeň časového působení udávají krátkodobé a dlouhodobé hodnoty.

Soubor koeficientů

Koeficienty	Jedno pole	Dvě pole	Tři pole
$k_M = M / p_d \cdot L^2$	0,125	0,125	0,100
$k_V = V / p_d \cdot L$	0,500	0,625	0,600
$k_{\delta M} = \delta_{\max.\text{moment}} \cdot E \cdot I / q \cdot L^4$	0,01302	0,00542	0,00688
$k_{\delta V} = \delta_{\max.\text{smyk}} \cdot G \cdot A_k / q \cdot L^2$	0,125	0,125	0,125

Tab. 6

Příklad 2.4: Spojitý nosník

Stanovení únosností spojitého nosníku o dvou polích vystaveného příčnému zatížení.

Rozpětí $L = 4,0 \text{ m}$

Zatížení:

Vlastní tíha včetně nosníku $g = 0,5 \text{ kN/m}$

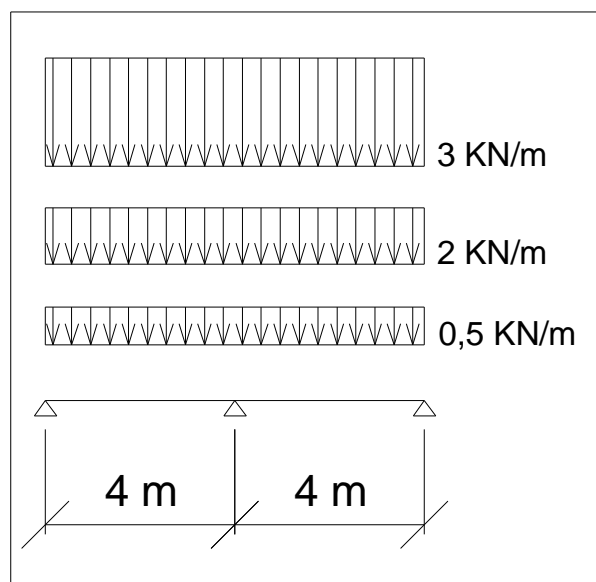
Spojitě zatížení krátkodobé $q_1 = 2,0 \text{ kN/m}$

Spojitě zatížení dlouhodobé $q_2 = 3,0 \text{ kN/m}$

Dílčí koeficient pro vlastní tíhu $\gamma_{fg} = 1,35$

Dílčí koeficient pro spojitě zatížení $\gamma_{f,q} = 1,5$

Maximální průhyb $L/300$



Obr. 9

Zvolený profil:

I 200 x 100 x 10 zatížený v ose y.

Z tabulky 6:

Dvě pole: $k_M = 0,125$ $k_V = 0,625$

$k_{\delta M} = 0,00542$ $k_{\delta V} = 0,125$

Maximální mezní stav:

$$p_d = \gamma_{fg} \cdot g + \gamma_{fg} \cdot (q_1 + q_2) = 1,35 \cdot 0,5 + 1,5 \cdot (2,0 + 3,0) = 8,2 \text{ kN/m}$$

$$M_d = k_M \cdot p_d \cdot L^2 = 0,125 \cdot 8,2 \cdot 4^2 = 16,4 \text{ kNm} = 16,4 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_{\max} = M_d / W_{xx} = 16,4 \cdot 10^6 / 236 \cdot 10^3 = 69 \text{ MPa}$$

$$f_{b,f,d} = 75 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} < f_{b,f,d} \quad (\text{OK})$$

$$V_d = k_V \cdot p_d \cdot L = 0,625 \cdot 8,2 \cdot 4 = 20,5 \text{ kN} = 20\,500 \text{ N}$$

$$\tau_{\max} = V_d / A_{k,y} = 20\,500 / 1,90 \cdot 10^3 = 11 \text{ MPa}$$

$$f_{\tau} / \gamma_{m,f} = 25 / 1,3 = 19,2 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\max} < f_{\tau} / \gamma_{m,f} \quad (\text{OK})$$

Provozní mezní stav

Průhyb (pro náhodilé zatížení):

$$q_k = q_1 + q_2 = 2,0 + 3,0 = 5,0 \text{ kN/m (celkové náhodilé zatížení)}$$

$$\begin{aligned} \sigma / L &= (k_{\sigma M} \cdot q_k \cdot L^3) / (E_{0^{\circ}} \cdot I_{xx}) + (k_{\sigma V} \cdot q_k \cdot L) / (G \cdot A_{k,y}) \\ &= (0,00542 \cdot 5,0 \cdot 4000^3) / (28000 \cdot 23,6 \cdot 10^6) + (0,125 \cdot 5,0 \cdot 4000) / (3000 \cdot 1,90 \cdot 10^3) \\ &= 0,0032 + 0,0004 \\ &= 1 / 326 \end{aligned}$$

$$\sigma / L < 1 / 300 \quad (\text{OK})$$

Výpočet šroubových spojů

Šroubový spoj umožňuje přenášet smykové síly mezi profily konstrukce. Smykové síly se přenášejí třením v ploše vzájemného soustředěného tlaku v okolí šroubů.

Ve statickém výpočtu šroubových spojů je nutné zajistit, aby profily se šrouby odolaly soustředěnému tlaku. Je také nutno zajistit, aby se stěna profilu v oblasti šroubu nevytrhla: tj. aby oblast šroubového spoje vykazovala dostatek únosnosti k přenesení sil na zbytek konstrukce.

Únosnost šroubového spoje je dostatečná, pokud spoj splní následující kritéria:

- Požadované síly ve šroubech jsou dostačující, aby byly v rovnováze smykové síly s přenášeným vnějším zatížením.
- Kontaktní tlak v oblasti profilů se musí přenést lokálně. Zajistí se to tím, že požadované síly ve šroubu nepřestoupí mezní hodnoty.

- Střihové síly, na které je dimenzován šroubový spoj, se musí přenést laminátem do zbývající oblasti mezi skupinou šroubů a zbytkem profilu; tj. nesmí dojít k tomu, aby se celý šroubový spoj vytrhl z profilu.

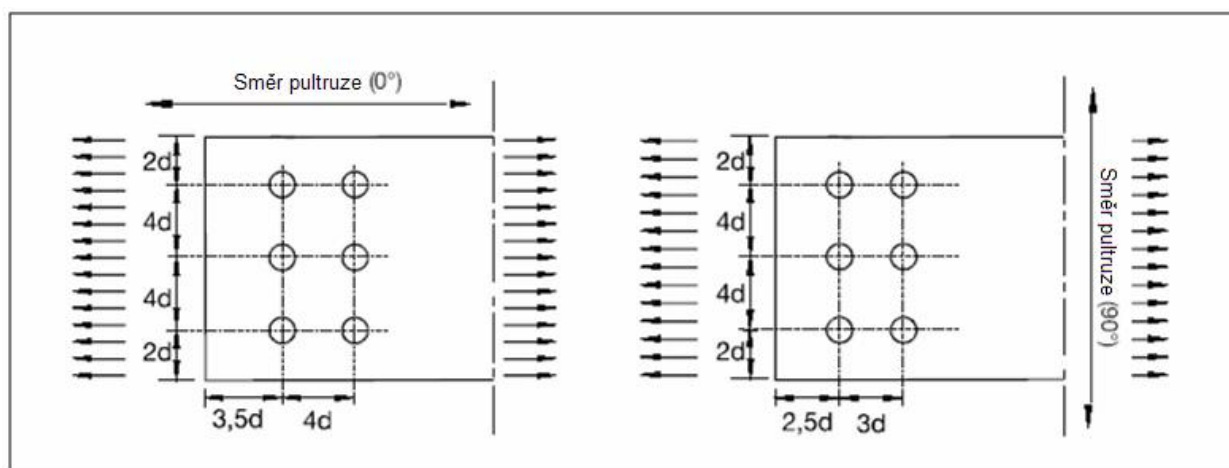
Síly ve šroubu u šroubového spojení působí podle teorie pružnosti. Převážně u statických zkoušek může být distribuce sil, která je určena plastickou teorií, reálná pro spoje, ve kterých jsou šrouby vystavovány střihu. Zkoušky ukazují, že šrouby jsou zpravidla ve vztahu k laminátu tak silné, že dojde k deformacím, které zaktivují ostatní šrouby. V případě vzniku trhliny v laminátu může velikost deformací před šrouby obvykle činit několik mm nebo více.

Všechny rozhodující druhy závad je třeba sledovat, aby se celá skupina šroubů nevytrhla z laminátu. Je třeba vyhodnotit několik možných druhů závad, aby se stanovila nosnost spoje. Příklady uvedené níže naznačují, jak se to má uskutečnit.

K dosažení očekávané nosnosti je důležité, aby se dodržely vzájemné vzdálenosti uvedené na obr. 10. Všimněte si významu směru pultruze, v níž leží hlavní vyztužující vlákna.

V jedné řadě by neměly být umístěny více jak čtyři šrouby. Je-li to nevyhnutelné, požadují se zvláštní výpočty a konzultace u statika.

Žádný pokus o vyřezání závitu v kompozitním materiálu se nepřipouští. Správné a nesprávně provedení je uvedeno na následující obrázcích.



Obr.10 - Minimální vzdálenosti

Lepená spojení

Používat lepidla (přilnavá činidla) může být vhodnou metodou pro spojování pultrudovaných profilů.

Lepidlo má mnoho výhod:

- je jednoduché vytvořit estetické spoje;
- lepené spoje profilů jsou typicky mnohem tužší než tradiční šroubová spojení;
- některé typy lepidel jsou mimořádně pevné, umožňují zmenšit prostor pro slepení;
- lepená spojení dobře vyhovují dynamickému namáhání.

Při používání lepených spojení je však třeba respektovat řadu podmínek:

- řada přilnavých činidel má vlastnosti závislé na čase a vlivu okolního prostředí, jako je vlhkost a chemické složení atmosféry;
- vady lepených styků se projevují náhle na rozdíl od šroubových spojení;
- únosnost lepeného spoje není úměrná ploše, která je slepená; únosnost určitého spojení se zvětšuje s lepenou plochou až do určitého okamžiku, kdy únosnost zůstane konstantní pro dané lepené místo; tuto vlastnost vyvolává skutečnost, že vznik trhliny je spojen s určitými tahovými napětími v přilnavé vrstvě, typicky při přechodu z jednoho profilu na druhý.

Protože vada lepeného spojení se projeví náhle, spojení v konstrukci přenášející síly se obvykle zajišťují šrouby. V mnoha případech se lepidlo aplikuje na styčné povrchy spojovaných profilů, což zvětší tuhost spojení za provozu.

Lepená spojení mají mnoho výhod při porovnání se šroubovými spojeními. Je-li k dispozici dostatek znalostí, není třeba předchozích ověřovacích zkoušek a lepená spojení nepochybně najdou svá uplatnění jako hlavní spojení u nosných konstrukcí. GDP KORAL s.r.o. se aktivně podílí na oblasti tohoto výzkumu.

Z mnoha zkoušek vyplývá, že kombinace šroubů a lepidla může být zajímavá, jestliže vhodně umístěné šrouby mohou zabránit rozvoji trhlinek, které vedou k vadám v lepených spoích.

Příklady lepených spojů jsou uvedeny na obr.

Obr.11 - Příklady lepených spojení