

DIMENZOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH PROFILŮ PREFEN



Materiálová struktura, základní pojmy

Při použití výpočetních vztahů pro kompozity je zapotřebí si uvědomit, že se jedná o materiál nehomogenní a anizotropní. Lze o nich také tvrdit, že se jedná o materiál ortotropní, tzn. že má charakter ortogonální anizotropie.

Homogenita kompozitů

To, že kompozity jsou materiály nehomogenní je dáno strukturou. Profily PREFEN se skládají ze dvou základních materiálů. Těmi jsou skleněná výtuz a matrice (pojivo). Skleněná výtuz obsahuje skleněná vlákna v podobě rovingů a rohoží. Matrice je polyesterová (řada 500) nebo vinylesterová (řada 600) pryskyřice plněná aditivou (proti UV záření, hoření atd.). Oba materiály se liší nejen svojí strukturou, ale hlavně mechanickými vlastnostmi, což jasně dokumentuje tabulka dole na této stránce.

Z tabulky vyplývá několik důležitých závěrů, které musíme zohlednit při výpočtech kompozitních profilů:

1. mechanické vlastnosti kompozitů silně ovlivňuje procentuální množství skleněné výtuz,
2. určujícím údajem pro výpočet deformace, tzn. např. průhybu je hodnota modulu pružnosti v tahu.

Dle Hookova zákona a pro izotropní materiál je deformace při jednosměrném namáhání, např. tahu definována vztahem:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}$$

(1)

U anizotropního materiálu záleží hodnota Youngova modulu pružnosti E na směru namáhání. Pokud se při zatěžování dílce z kompozitního materiálu projevují pouze jednosměrná napětí (tlak, ohyb dlouhého štíhlého nosníku), lze použít metodu a výsledky platné pro izotropní materiály i pro kompozity za předpokladu, že je v konstrukčních výpočtech použito správné hodnoty E pro daný směr.

Důležitost vysoké míry anizotropie kompozitních materiálů pro relevantní výpočetní formule dokládá následující příklad:

Příklad: Uvažujme pultruzi vyrobenou plnou kruhovou tyč s 70–80% obsahem sklených vláken rovingů (bez rohoží). Bude mít následující mechanické vlastnosti:

Pevnost v ose profilu:

pevnost v tahu je 650 až 1200 MPa, pevnost v tlaku je 400 až 700 MPa

Pevnost kolmo na osu profilu:

pevnost v tahu je 30 až 80 MPa, pevnost v tlaku je 170 až 220 MPa.

Tyto poměrně velké rozdíly jsou dány velkou anizotropií kompozitů s jednosměrně orientovanými výtuzemi.

Smyková pevnost se pohybuje v intervalu od 50 do 90 MPa. Úhlová závislost pevnosti v tahu a tlaku je nejsilnější pro vnější napětí působící pod úhlem kolem 10° vzhledem k hlavní ose, tj. ke směru vláken rovingu. Deviace o 7° způsobí až 50% pokles limitní pevnosti. Tuto nepříjemnou vlastnost kompozitních materiálů lze částečně eliminovat použitím skelných (plošných) rohoží. Skleněné rohože jsou složeny buď z „nekoněčně“ dlouhých nebo sekaných, (kolem 50 mm dlouhých) vláken. Z velikosti deformace „ε“ ve vztahu (1) a z hodnot „E“ se dá odvodit, že kompozity se skleněnou výtuzí mají řádově 8 až 10× větší deformace než homogenní materiály. To má vliv na způsob uložení nosníku. Při velkém průhybu vzniká nebezpečí vybočení profilu a to díky výrobním tolerancím, způsobu uložení podpěr a působení vnější síly, která nemusí být v rovině symetrie profilu. Proto platí, že:

Příčně volné kompozitní nosníky se nedoporučuje používat !

Materiál	Hustota [kgm ⁻³]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]
Polyesterová pryskyřice	1,1 až 1,5	1,3 až 4,5	42 až 85
Skleněná vlákna	2,54	74	350
PREFEN řady 500	1,8	21	220

Dimenzování kompozitních profilů se v drtivé většině provádí na **přípustné deformace**, průhyby a nikoliv na dovolené napětí, avšak je také užitečné kontrolovat smyková napětí. Pokud však větší deformace nevedí uživatele, pak tím spíše nevedí kompozitním profilům. Ze zkoušek i z praxe je zřejmé, že kompozitům do jisté míry deformace nevedí a po odlehčení se vrací do původního stavu **bez deformační hystereze**.

Shrnutí:

U kompozitních nosníků PREFEN namáhaných na ohyb se sledují tři vlivy:

1. **Napětí** od skutečného zatížení.
2. **Stabilita** daná odolností proti kroucení a bočním deformacím.
3. **Průhyb** v souvislosti se zatížením a dovoleným napětím.

Napětí

U nosníků se uvažuje vliv ohybového a smykového napětí. Ohybové napětí pro profily typu I určují lokální deformace vnějších vláken.

Stabilita

Nosník, který není příčně podepřen (uložen) může vybočit, zkroutit se mimo rovinu zatížení. Pro použití na podlahy a stropy je nutné profily příčně zajistit, podepřít. Pro I profily platí pravidlo, že je nutné rozlišovat zda mají či nemají příčné uložení.

Průhyb

Průhyb u kompozitních nosníků se počítá z působení ohybového a smykového napětí. U dlouhých nosníků převládá vliv ohybového napětí, u krátkých nosníků převládá smykové napětí.

Ohyb přímých kompozitních profilů

Pro namáhání ohybem jsou z důvodů vnitřní konstrukce a symetrie geometrického tvaru vhodné tyto tři druhy kompozitních profilů PREFEN: I profily, čtvercové a obdélníkové trubky a U profily.

Pro profily PREFEN jsou charakteristické hodnoty mechanických vlastností:
 Modul pružnosti v tahu E je 19 až 22 GPa.
 Modul pružnosti ve smyku G je 2,95 GPa.

Výpočet napětí od zatížení

Ohybové napětí:

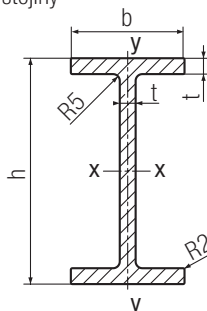
$$\sigma_o = \frac{M_{o,max}}{W_o}$$

kde: $M_{o,max}$ je max. ohybový moment
 W_o je moment odporu průřezu v ohybu

Smykové napětí

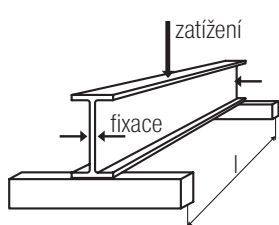
$$\tau = \frac{T}{A_w}$$

kde: T je posouvající síla
 A_w je plocha stojiny



Geometrie řezu I profilu

I profily PREFEN



Nosník s příční fixací

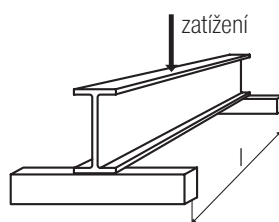
Mezní ohybové napětí:

$$\sigma_{o,max} = \frac{0,5 \times E}{\left(\frac{b}{t}\right)^{1,5}} \leq 210 \text{ Mpa}$$

Dovolené ohybové napětí:

$$\sigma_{o,dov} = \frac{\sigma_{o,max}}{n} = \frac{210}{2,5} = 84 \text{ MPa}$$

Bezpečnostní koeficient $n = 2,5$



Nosník s volnými podporami

Mezní ohybové napětí:

$$\sigma_{o,max} = \frac{C_1}{W_o} \sqrt{N^2 + \frac{h^2 \times B^2}{4}} \leq 210 \text{ Mpa}$$

$$N = \frac{\pi}{K_v \times l} \sqrt{E \times J_y \times G \times J_k}$$

$$B = \frac{\pi^2 \times E \times J_y}{(K_v \times l)^2}$$

Tabulka č. 1: Koeficienty K_v a C_1

Zatížení	Průběh ohyb. momentu	Příčná fixace	koeficient K_v	koeficient C_1
		ne	1	1
		ne	1	1,13
		ano	0,5	0,97
		ne	1	1,13
		ano	0,5	0,86
		ne	1	1,35
		ano	0,5	1,07
		ne	1	1,7
		ano	0,5	1,04
		ne	1	1,04

kde: K_v, C_1 jsou koeficienty uvedené v tabulce 1
 W_o je moment odporu průřezu v ohybu
 h je výška I profilu
 l je rozteč podpor
 J_x je kvadratický moment průřezu k ose Y-Y
 J_y je kvadratický moment průřezu k ose X-X
 G je modul pružnosti ve smyku
 J_k je moment tuhosti v křutu
 E je modul pružnosti v tahu

Dovolené ohybové napětí:

$$\sigma_{o,dov} = \frac{\sigma_{o,max}}{n} = \frac{210}{2,5} = 84 \text{ MPa}$$

Bezpečnostní koeficient $n = 2,5$

Dovolené smykové napětí:

$$\tau_{dov} = 10,3 \text{ MPa}$$

Čtvercové trubky PREFEN

Výpočetní formule jsou platné pro příčně uložené i volné podpory !

Mezní ohybové napětí:

$$\sigma_{o,max} = \frac{E}{16 \times \left(\frac{b}{t}\right)^{0,85}} \leq 220 \text{ Mpa}$$

kde: E je modul pružnosti

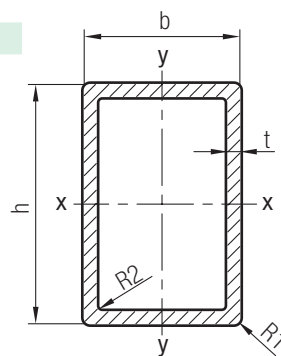
Dovolené ohybové napětí:

$$\sigma_{o,dov} = \frac{\sigma_{o,max}}{n} = \frac{220}{2,5} = 88 \text{ MPa}$$

Bezpečnostní koeficient n=2,5

Dovolené smykové napětí:

$$\tau_{dov} = 10,3 \text{ MPa}$$



U profily PREFEN

Předpokládá se pouze příčně uložený profil!

Mezní ohybové napětí:

$$\sigma_{o,max} = \frac{E}{27 \times \left(\frac{b}{t}\right)^{0,95}} \leq 210 \text{ Mpa}$$

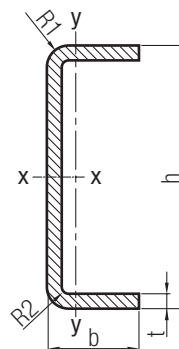
kde: E je modul pružnosti

Dovolené ohybové napětí:

$$\sigma_{o,dov} = \frac{\sigma_{o,max}}{n} = \frac{210}{2,5} = 84 \text{ MPa}$$

Dovolené smykové napětí:

$$\tau_{dov} = 9,2 \text{ MPa}$$



Výpočet průhybu pro konstrukční profily

Zatížení spojitým rovnoměrným zatížením

$$\omega = K_b \frac{ql^4}{EJ_x} + K_v \frac{ql^2}{A_w G}$$

Zatížení osamělou silou

$$\omega = K_b \frac{Pl^3}{EJ_x} + K_v \frac{Pl}{A_w G}$$

kde: $K_v = 0,35$

$K_v = 1,2$ pro konzolu

K_b viz tabulka 2

q spojitě zatížení

l rozpětí podpor, délka konzoly

E modul pružnosti v tahu

J_x kvadratický moment průřezu

A_w plocha stojiny

G modul pružnosti ve smyku

P osamělá síla

Tabulka č. 2: Koeficient K_b

Typ zatížení	koeficient K_b
	0,013
	0,021
	0,029 v l/2 0,021 v l/4
	0,003
	0,005
	0,125
	0,333

Vzpěr kompozitních sloupů

Pro namáhání na vzpěr jsou vhodné tyto profily PREFEN z důvodů jejich vnitřní konstrukce a symetrie geometrického tvaru : I profil, L profil, kruhová trubka, čtvercová trubka.

Sloupy z profilů PREFEN dělíme na krátké a dlouhé sloupy.

Štíhlost profilů PREFEN se určuje takto:

$$\lambda = \frac{K \times l}{r}$$

kde: l je délka sloupu
 r je kvadratický poloměr průřezu
 K - koeficient typu vzpěru (viz. tabulka č. 3)

Výpočet provedeme vždy pro krátký i dlouhý sloup. Určující je menší napětí !

Bezpečnostní koeficient pro všechny případy volíme $n=3,0$.

Napětí od zatížení tlakem:

$$\sigma_d = \frac{P}{A}$$

kde: P je axiální síla, A je plocha průřezu

Mezní napětí v tlaku pro I profil

Krátký sloup:

$$\sigma_{Dk} = \frac{0,5 \times E}{\left(\frac{b_f}{t_f}\right)^{1,5}} \leq 210 \text{ MPa}$$

kde: b_f je šířka pásnice, t_f je tloušťka pásnice

Dlouhý sloup :

$$\sigma_{Dd} = \frac{4,9 \times E}{\left(\frac{K \times l}{r}\right)^{1,7}} \leq 210 \text{ MPa}$$

Mezní napětí v tlaku pro L profil

Krátký sloup:

$$\sigma_{Dk} = \frac{E}{27 \times \left(\frac{b}{t}\right)^{0,95}} \leq 210 \text{ MPa}$$

kde: b je šířka pásnice, t je tloušťka pásnice

Dlouhý sloup:

$$\sigma_{Dd} = \frac{E}{56 \times \left(\frac{K \times l}{r}\right)^{0,55}} \leq 210 \text{ MPa}$$

Mezní napětí v tlaku pro kruhové trubky

Krátký sloup:

$$\sigma_{Dk} = \frac{E}{16 \times \left(\frac{D_f}{t}\right)^{0,85}} \leq 210 \text{ MPa}$$

kde: D_f je vnější průměr, t je tloušťka stěny

Dlouhý sloup:

$$\sigma_{Dd} = \frac{1,3 \times E}{\left(\frac{K \times l}{r}\right)^{1,5}} \leq 210 \text{ MPa}$$

Mezní napětí v tlaku pro čtvercové trubky

Krátký sloup:

$$\sigma_{Dk} = \frac{E}{16 \times \left(\frac{b}{t}\right)^{0,85}} \leq 210 \text{ MPa}$$

kde: D_f je vnější průměr, t je tloušťka stěny

Dlouhý sloup:

$$\sigma_{Dd} = \frac{1,3 \times E}{\left(\frac{K \times l}{r}\right)^{1,3}} \leq 210 \text{ MPa}$$

Dovolené napětí v tlaku pro všechny doporučené profily

Krátký sloup:

$$\sigma_{Ddk} = \frac{\sigma_{Dk}}{n}$$

Dlouhý sloup:

$$\sigma_{Ddd} = \frac{\sigma_{Ddk}}{n} \leq \sigma_{Ddk}$$





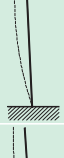

Dovolené zatížení sloupu pro všechny doporučené profily

$$P_{k,dov} = \sigma_{Ddk} \times A$$

$$P_{d,dov} = \sigma_{Ddd} \times A$$

kde: A je plocha průřezu

Tabulka č. 3: Koeficient K

Způsob uložení	Koeficient K
 Oba konce jsou uloženy otočně	1,00
 Oba konce jsou pevně vetknuty	0,65
 Jeden konec je uložen otočně, druhý je vetknutý	0,80
 Jeden konec je vetknut, druhý je volný	2,10
 Jeden konec je vetknutý, druhý je posunutý	1,20
 Jeden konec je uložen otočně, druhý je posunutý	2,00

PODPORA PŘI DIMENZOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH PROFILŮ

Pro potřeby projektantů, konstruktérů a ostatních jsme vytvořili jednoduchou tabulku v Excelu pro kontrolu nosníků a sloupů z konstrukčních kompozitních profilů PREFEN.

Tato tabulka je volně šiřitelná a můžete si o ni požádat nebo si ji stáhnout z našich webových stránek www.prefa-kompozity.cz. Najdete ji v menu „Společnost“ pod položkou „Ke stažení“.

Tabulka byla vytvořena v prostředí Microsoft Excel a tím pádem není nutné nic instalovat. Je určena pro kontrolu konstrukčních profilů na ohyb a vzpěr. Jednoduše lze zkontrolovat I, L, U profily a čtvercové trubky na uvedené způsoby zatížení.

Způsob použití tabulky

Data se zadávají do zeleně vybarvených polí, výsledky se zobrazují ve žlutých buňkách. Slovní výsledky jsou zobrazovány červeným textem.

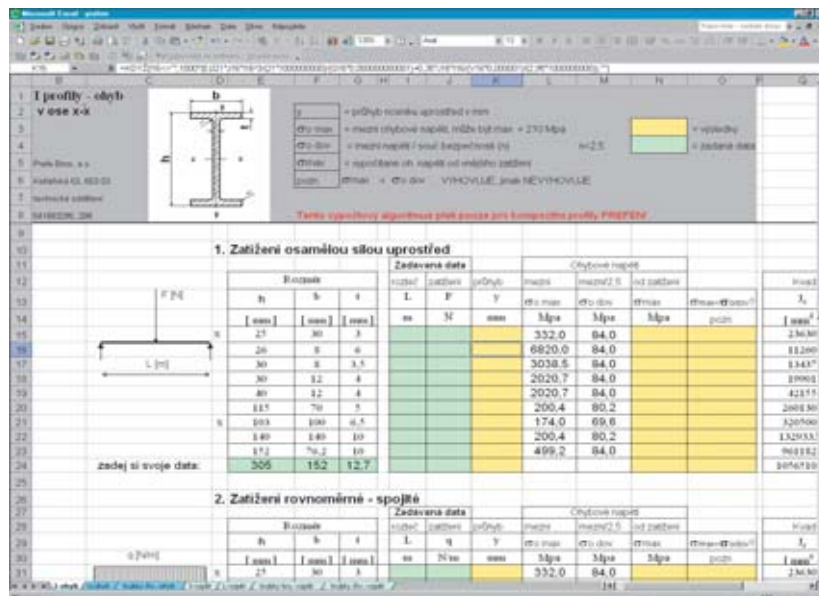
Výpočet nosníků na ohyb

U těchto listů tabulky bude vyžadováno zadání rozteče podpor v metrech jako i velikost a způsob zatížení nosníku ze zvoleného profilu. Což ilustrují i schémata, která jsou součástí jednotlivých listů tabulky.

Tabulka je navržena pro tyto způsoby zatížení staticky určitých nosníků:

- a) osamělá síla uprostřed oboustranně podepřeného nosníku
- b) spojitě zatížení u oboustranně podepřeného nosníku
- c) osamělá síla na konci vetknutého nosníku

Jako výstupní veličina je sledována pouze hodnota velikosti ohybového napětí od zatížení. A z porovnání s dovoleným napětím vylpne slovní hodnocení, zda-li nosník vyhovuje nebo ne.



Důležité upozornění: Program porovnává skutečné napětí od zatížení s dovoleným napětím pro profily PREFEN, pokud je tato podmínka splněna, objeví se v poli „Poznámka“ text „VYHOVUJE!“ v opačném případě „NEVYHOVUJE!“. To znamená, že nosník sice vyhovuje z hlediska napětí, které je nižší než dovolené napětí, ale neznamená to, že nosník bude vyhovovat i podle kritéria velikosti průhybu.

DOPORUČENÍ: Kontrolovaný nosník vždy posuzujte podle obou kritérií, t.j. podle dovoleného napětí a velikosti dovoleného průhybu.

Výpočet sloupů na vzpěr

Vstupní data jsou délka (výška) sloupu v metrech a velikost a způsob zatížení. Hodnotícím kritériem je opět porovnání dovoleného zatížení se skutečným.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet with two main calculation tables. The first table, '1. Vzpěr - typ 1', and the second, '2. Vzpěr - typ 2', both have columns for 'Vlastnosti materiálu' (Material properties), 'Geometrie' (Geometry), and 'Zatížení' (Load). The 'Zatížení' column is further divided into 'Dovolené zatížení' (Allowable load) and 'Skutečné zatížení' (Actual load). The tables are color-coded with green and yellow cells, indicating different calculation steps or results.

Další možnosti použití tabulky

Algoritmus výpočtu je sestaven nejen pro naše standardní konstrukční profily PREFEN, ale je možné si zkontrolovat jakýkoliv jiný profil uvažovaných tvarů. Je třeba si však uvědomit, že by se jednalo o tažený kompozitní profil, se skladbou a objemem skelné výtuzže podle zkušeností a reglementů výrobce PREFA KOMPOZITY, a.s.

Odborné poradenství a konzultace

V případě potřeby můžete kontaktovat úsek Vývoje a inovací. Jsme ochotni poskytnout odborné rady a konzultace při dimenzování profilů i celých konstrukcí. Rádi vám poskytneme konzultace i u individuálně navržených profilů a konstrukcí.

Kontakt: Ing. Jan Prokeš,
vedoucí úseku Vývoj a inovace,
telefon: 541 583 294,
e-mail: prokes@prefa.cz

Místo pro poznámky

