

Vysoká škola strojní a textilní Liberec
nositelka Řádu práce

Fakulta strojní

katedra obrábění a montáže

obor : 23-07-8 výrobní stroje

zaměření : Jednouúčelové obráběcí a montážní stroje

NÁVRH POUŽITÍ VHODNÝCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ
NA KONSTRUKČNÍ DÍLY STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

KOM - OS - 184

Přemysl HRŮZA

Vedeucí práce :

Konzultant :

Doc. J. Gazda CSc. KOM

Ing. V. Humeň KMP

Počet stran	81
Počet příloh a tabulek	16
Počet obrázků	40
Počet výkresů	0
Počet modelů nebo jiných příloh ..	2

Liberec 1. června 1989

Vysoká škola: strojí a textilní Fakulta: strojní
Katedra: obrábění a montáže Školní rok: 1988 - 89

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Přemysla H r ů z u
pro
23 - 20 - 8 stroje a zařízení pro strojírenskou výrobu
obor

Vedoucí katedry Vám ve smyslu nařízení vlády ČSSR č. 90/1980 Sb., o státních závěrečných zkouškách a státních rigorózních zkouškách, určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Návrh použití vhodných kompozitních materiálů**
na konstrukční díly strojů a zařízení.

Zásady pro vypracování:

1. Národohospodářský význam zadání.
2. Studium literatury se zaměřením na aplikaci kompozitů v konstrukci obráběcích strojů a průmyslových robotů.
3. Posouzení vlastností kompozitu jako konstrukčních materiálů a výběr vhodného druhu pro další aplikaci.
4. Konstrukční a výpočtový návrh vybraných dílů daného strojního zařízení.
5. Návrh technologického postupu výroby daných dílů.
6. Ekonomické a technické zhodnocení návrhu.
7. Shrnutí poznatků a závěry.

V 223/89 S

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 8
PSČ 461 17

Rozsah grafických prací: 5 - 6 výkresů

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran textu

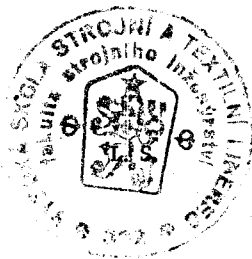
Seznam odborné literatury:

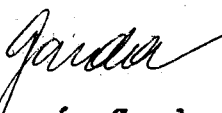
- 1/ Agarwal - Broutman: Vláknové kompozity, SNTL Praha 1987.
- 2/ Yang - Shanyi D.U.: An exploratory study in to fatigue of Composite under Spectrum loading Journal of Composite Materials 1983.
- 3/ Wang, Chim: Fatigue damage and degradation in Rardem short fiber SMC composite. Journal of composite Materials 1983.


Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 26. 10. 1988

Termín odevzdání diplomové práce: 2. 6. 1989




Doc. Ing. Jaromír Gazda, CSc.
Vedoucí katedry


Prof. Ing. Vladimír Prášil, DrSc.
Děkan

v Liberci dne 26. 10. 1988

PROHLÁŠENÍ

Místopřisežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci
vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci dne 1. června 1989

Podpis:

Čestmír Kráča

Obsah

číslo kapitoly	název kapitoly	str.
0.	Seznam použitých zkratk	6.
1.	Úvod	8.
2.	Úvahy vedoucí k použití kompozitů	11.
3.	Dlouhovláknové kompozity	14.
3.1.	Jednosměrové dlouhovláknové kompozity	14.
3.1.1.	Podélný a příčný modul pružnosti kompozitu	16.
3.1.2.	Podélná a příčná pevnost kompozitu	16.
3.1.3.	Mechanismus zatěžování	17.
3.2.	Příklad výpočtu nosníku z kompozitů	19.
3.2.1.	Výpočet čistě kompozitního nosníku	20.
3.2.2.	Výpočet nosníku ze složených materiálů	24.
3.2.3.	Výpočet nosníku ocel-kompozit a hliník-kompozit	28.
4.	Spoje v kompozitech	40.
4.1.	Lepené spoje	40.
4.2.	Mechanické spoje	41.
4.3.	Koncentrace napětí v kompozitech v okolí otvorů	44.
5.	Krátkovláknové kompozity	51.
5.1.	Vliv délky vlákna	52.
5.2.	Kryt brousícího kotouče	53.
5.2.1.	Konstrukce ochranného krytu	54.
5.2.2.	Výpočet ochranného krytu	56.
6.	Partikulové kompozity	65.
6.1.	Plastbeton	65.

6.2.	Vláknobeton	67.
6.3.	Drátkobeton	67.
7.	Ekonomické zhodnocení návrhů	70.
7.1.	Skříňový nosník vyztužený kompozitními pásy	71.
7.2.	Kryt brousícího kotouče	72.
7.3.	Betonová lože obráběcích strojů	72.
8.	Shrnutí poznatků	73.
8.1.	Dlouhovláknové kompozity	73.
8.2.	Krátkovláknové kompozity	74.
8.3.	Partikulové kompozity	75.
8.4.	Celkové shrnutí a doporučení	75.
9.	Přílohy	77.
9.1.	Příloha 1.	77.
9.2.	Příloha 2.	79.
10.	Literatura	80.

Seznam použitých značek

- L - podélný směr uložení vláken
T - příčný směr uložení vláken
 E_L - podélný modul pružnosti kompozitu
 E_T - příčný modul pružnosti kompozitu
 ν_{LT} - hlavní Poissonovo číslo
 ν_{TL} - vedlejší Poissonovo číslo
 G_{LT} - modul pružnosti kompozitu ve smyku
 V_f - objemový podíl vláken
 V_m - objemový podíl matrice
 ϵ_c - relativní přemístění kompozitu
 ϵ_f - relativní přemístění vláken
 ϵ_m - relativní přemístění matrice
 G_c - napětí kompozitu v podélném směru
 G_f - napětí vláken
 G_m - napětí matrice
 G_{pc} - příčná pevnost matrice
 G_{pm} - příčná pevnost kompozitu
 F_c - síla přenášená kompozitem
 F_f - síla přenášená vlákny
 F_m - síla přenášená maticí
 ℓ - délka vetknutého celokompozitního nosníku
b - šířka vetknutého celokompozitního nosníku
 D_o - tuhost nosníku složeného z několika vrstev
 D_{ok} - tuhost složeného nosníku dle /3/
 Q_{11} - tuhost kompozitní vrstvy
 Δh - tloušťka k-té vrstvy celokompozitního nosníku
 h_k - výška k-té vrstvy celokompozitního nosníku

- I_{yi} - kvadratický moment setrvačnosti k ose y
 A_i - plocha i-té vrstvy
 z_{gi} - poloha těžiště i-té vrstvy
 z_0 - poloha neutrální vrstvy
 H - vnější rozměr skříňového nosníku
 h - vnitřní rozměr skříňového nosníku
 θ - parametr
 c - koeficient tvaru
 ε - koeficient špičatosti
 G_x - zatížení v ose x
 G_y - zatížení v ose y
 τ_{xy} - smykové zatížení
 G_t - tangenciální napětí
 α - úhel tečny k obrysu díry
 K_t - součinitel koncentrace napětí
 G_{tmax} - maximální napětí vláken
 l_t - přenosová délka vlákna
 l_c - kritická délka vlákna
 G_{pf} - mez pevnosti vlákna
 $G_{m.s.}$ - maximální střední napětí pěnového vyložení
 ε_{max} - maximální relativní přemístění pěnového vyložení
 A - deformační práce pěnového vyložení
 V - objem pěnového vyložení
 D - průměr brousícího kotouče
 m - hmotnost krytu
 q - spojité obtížení nosníkové a skořepinové náhrady
 K - poměrný koeficient

1. Úvod

V poslední době žijeme ve znamení neustálých posunů v našem nahlížení na skutečnost. Co se zdálo ještě nedávno nemožné a před několika lety příliš fantastické, nabývá velmi rychle konkrétní podobu. Světová věda produkuje záplavu technických objevů v oblasti mikroelektroniky, robotiky, chemie, fyziky a dalších. Pokud nechceme zůstat pozadu za světovou špičkou ve výrobě, nemůžeme za ní zaostávat ani ve vědě a výzkumu. Přejít našeho národního hospodářství na intenzivní cestu rozvoje nelze uskutečnit bez rychlého a širokého uplatňování výsledků výzkumu v praxi. Na tribuně XVII. sjezdu KSČ a následujících zasedáních ÚV KSČ byl vytyčen a upřesňován program rozvoje klíčových odvětví, bez nichž je intenzifikace našeho národního hospodářství nemyšlitelná. Jedním z těchto směrů rozvoje je zavádění nových materiálů a nekonvenčních technologií. Tyto nové materiály mají celou řadu předností, ale i některé nevýhody a úlohou konstruktéra je plně využít předností materiálu a potlačit jeho slabiny. Chování nových materiálů, dané jejich specializací pro určitý účel, je aložitější než chování konvenčních materiálů (konvenčními materiály rozumíme materiály běžně používané ve strojírenství - ocel, litina, hliník, barevné kovy, plasty apod.).

Tématem této práce je rozbor možností použití jedné ze skupin těchto nových materiálů nazývané souhrnně Kompozitní materiály. Zájemci o leteckou techniku zde mohou namítnout, že nejde o nic nového a že právě v letectví a

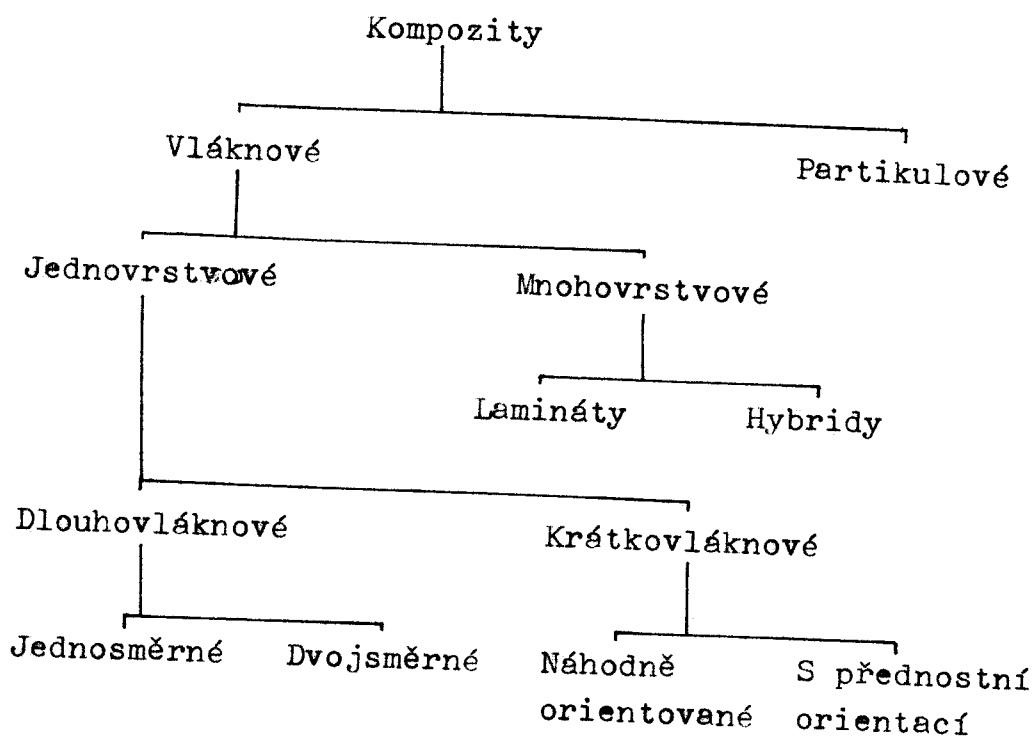
kosmonautice se kompozity používají již poměrně dlouho. Faktum je, že různé typy laminátů (což je jeden z typů kompozitů) se v letecké technice široce využívají a že původní určení kompozitů bylo skutečně pro špičkovou leteckou a kosmickou techniku. Tyto počáteční výzkumy probíhaly ve vojenských laboratořích a byly určeny pro vojenské účely. Postupně přešel vývoj i výroba kompozitů i do civilního sektoru a začalo se s jejich nebývale širokým používáním i v jiných oblastech než je letectví a kosmonautika. V této souvislosti je poněkud paradoxní, že jediný tuzemský výrobce, jenž kompozity používá ve větším měřítku nemůže z důvodu utajení předávat své zkušenosti dál. Jedná se o výrobce známých L-39 Albatros Aero Vodochody jejichž informace jsou jen velmi kusé a obecné. Slibnější je v tomto směru spolupráce s VÚ Monokrystaly Turnav, kde se podařilo vyvinout uhlíkové vlákno jako základní komponent vláknových kompozitů.

Celkově lze říci, že úroveň informací o kompozitech je u nás značně nízká a až na ojedinělé články několika průkopníků nezbyvá, než studovat zahraniční literaturu jež navíc není vždy dobře dostupná. Proto cílem první části této práce bylo zejména prostudovat dostupnou literaturu a část z ní zpracovat ve formě rešerše tak aby případný následovník nemusel zápolit se záplavou článků jejichž smysl mu zejména počátku mnoho neřekne. Velice vítaným pomocníkem pro všechny zájemce o tento obor je publikace / 1 / kde je uceleně pojednáno o hlavních typech kompozitů s preferencí vláknových kompozitů. Z této publikace je přejata i definice kompozitu respektovaná i v dalších částech práce.

Definice kompozitu:

" Kompozity tvoří jedna nebo více nespojitých fází ponořených ve spojitě fázi. Diskontinuitní fáze je obvykle tvrdší a pevnější než spojitá fáze a nazývá se VYZTUŽENÍ, zatímco spojitá fáze se nazývá MATRICE ".

Z definice vyplývá, že pojem kompozit je značně široký a zahrnuje značné množství velmi rozmanitých materiálů. Re- prezentativními příklady jsou již vzpomínané lamináty, plně- né plasty ale i obyčejný železobeton. Pro lepší orientaci v této směsici materiálů se obvykle používá následující sche- ma přejaté z /1/.



Obr.1. Rozdělení kompozitů

Při úvahách o případném využití kompozitů se zákonitě naskytá otázka: " Proč vůbec používat kompozity? Jaké výhody přinášejí?". Odpovědět na tyto otázky alespoň v určitém rozsahu je cílem této práce.

2. Úvahy vedoucí k použití kompozitů

Je všeobecně známou skutečností, že po energetické krizi v 70. letech si nikdo nemůže dovolit plýtvat ropou a jejími deriváty. Přitom petrochemické zpracování ropy má účinnost 90 %, její spalování sotva 50 % a výroba energie už jen 30 %. Z toho jasně vyplývá snaha potlačit a omezit spotřebu ropy na vytápění a výrobu energie a maximálně využít ropu jako chemickou surovinu.

V této situaci vyniká jedna z vlastností kompozitů s plastovou maticí - nízký podíl energie na kg výrobku. Tato vlastnost je pro různé materiály zachycena v tabulce I. přejaté z /2/.

Materiál	Energetický obsah [MJ/kg]
ocel. plech	29
hliník. plech	175
hliník. odlitek	90
skleněná vlákna	40-50
výrobní procesy	1-5
kompozity	80

Tab. I. Energetický obsah materiálů

V tabulce II. jsou zachyceny poměrné ceny různých materiálů, z nichž je vidět cenová výhodnost použití kompozitů.

Uvážíme-li, že měrná hmotnost kompozitů je až 5 krát nižší než u oceli, energetické relace vztažené na jednotku objemu budou ještě příznivější. To v praxi znamená účinné využití hmoty a energie vložené do výroby.

Výhodou zvláště krátkovláknových a v některých aplikacích i dlouhovláknových kompozitů, je snadná a rychlá výroba i velmi složitých dílů (viz příloha 1), možnost a spíše nutnost automatizace a robotizace výroby. Moderní kompozity automatizaci přímo vyžadují, má-li být dosaženo ekonomické výroby. Využití rozmanitosti plastů, pryskyřic a výztuží umožňuje pro daný problém navrhnout konkrétní tvar a materiál s nejlepším využitím vlastností kompozitů. Tato úvaha vede k vytvoření moderního automatizovaného pracoviště řízeného počítačem, v jehož paměti je uložena řada materiálů a jejich vlastností a s jehož pomocí je navrhován a vyráběn výrobek.

Pro alespoň základní představu o výrobě kompozitů, je možné si představit krátkovláknové kompozity jako vyztužené plasty (v některých pramenech se takto přímo označují), které lze vyrábět na upravených běžných plastikářských strojích (vstřikování, lisování za tepla). Dlouhovláknové kompozity reprezentují již vzpomínané lamináty vyráběné lisováním za tepla nebo navíjením kompozitních pásek do různých rotačních tvarů. Případné zájemce o konkrétní druhy výroby lze odkázat zatím výhradně na zahraniční literaturu, firemní prospekty a v poslední době i diplomové práce, zabývající se například vyztuženými vstřikovanými polyamidy, polypropylenem apod.

Poměrné ceny	nástroj. ocel	ocelový ingot	hliník. slitina	UP/sklo	skleněný roving
cena/kg	1	0,22	0,96	0,64	0,62
cena/dm ³	1	0,22	0,33	0,11	0,20

Tab.II. Poměrné ceny materiálů

Na závěr úvodní části uveďme ještě tabulku porovnávající vlastnosti kompozitů a konvenčních materiálů z /1/.

Materiál	Modul pružnosti v tahu E GPa	Hustota kg/m	Měrný modul E	Pevnost v tahu GPa	Měrná pevnost
Vlákna					
E-sklo	72	2 540	29	3,5	1,4
S-sklo	86	2 480	35	4,6	1,9
Grafit	390	1 900	205	2,1	1,1
Bór	385	2 630	146	2,8	1,1
Křemen	72	2 190	33	5,8	2,7
Wolfram	414	19 300	21	4,2	0,2
Kevlar	130	1 500	87	2,8	1,9
Konvenční materiály					
Ocel	210	7 800	27	0,3-2,1	0,3
Hliník	70	2 700	26	0,2-0,6	0,2
Sklo	70	2 500	28	0,7-2,1	0,8
Wolfram	350	19 300	18	1,1-4,1	0,4

Tab.III. Vlastnosti materiálů

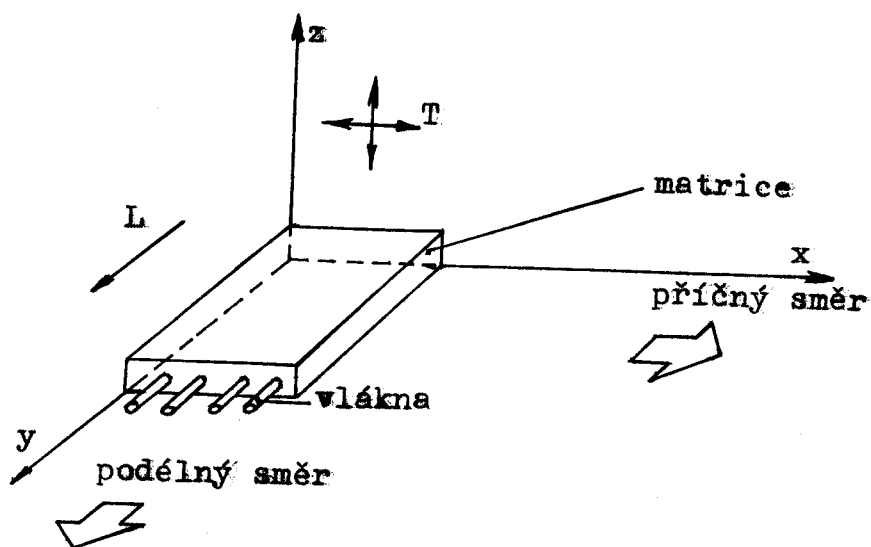
Za povšimnutí stojí zejména čtvrtý a šestý sloupec tabulky, kde jsou údaje vztažené na měrnou hmotnost. Zvláště měrná pevnost vláken je o jeden až dva řády vyšší než u konvenčních materiálů.

3. Dlouhovláknové kompozity

V této kapitole bude pozornost věnována základnímu typu této skupiny a tím jsou :

3.1 Jednosměrové dlouhovláknové kompozity

Za dlouhovláknové se obvykle považují kompozity s kontinuálním vláknem, kde vlákno přenáší hlavní část namáhání. Základní stavební jednotkou vícevrstevných kompozitů je LAMINA - vrstva s jednosměrně uloženými vlákny. Idealizovaná lamina je na obr.2.



Obr.2. Idealizovaná lamina

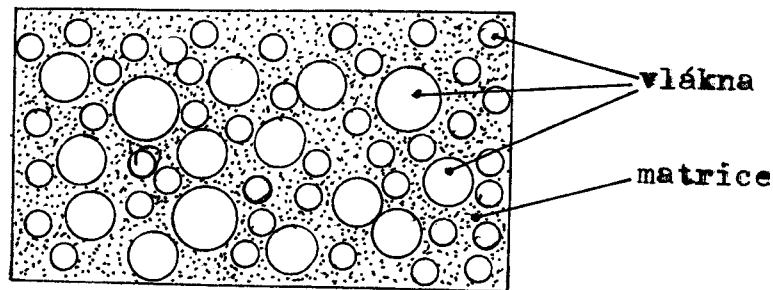
Směry L a T vyznačují uložení materiálu:

L - longitudinální - podélný směr

T - transversální - příčný směr

kde T je kterýkoli směr v rovině xz.

Lamina má maximální pevnost ve směru podélném, v ostatních dvou směrech jsou její vlastnosti přibližně tytéž (a mnohem nižší). Lamina s jedním vláknem v tloušťce vrstvy může vzniknout pouze u hrubých vláken (bórová), ostatní typy vláken se rozmisťují po průřezu nahodile - viz obr.3.



obr.3. Rozložení vláken po průřezu kompozitu

Toto rozložení vláken je typické pro některé kompozitní vrstvy vyztužené skleněnými, grafitovými nebo polymerovými vlákny. Tloušťka jedné laminy nepřesahuje 0,1 mm, zatímco tloušťka vlákna je řádově $10\ \mu\text{m}$, tedy 10 krát méně.

Pro běžné izotropní materiály vystačíme při konstrukčních výpočtech s modulem pružnosti v tahu, Poissonovým číslem a mezí pevnosti. Vláknové kompozity jsou výrazně anizotropní a pro jejich popis potřebujeme pět technických konstant:

E_L - modul pružnosti v podélném směru

E_T - modul pružnosti v příčném směru

ν_{LT} - hlavní Poissonovo číslo

ν_{TL} - vedlejší Poissonovo číslo

G_{LT} - modul pružnosti ve smyku

Z těchto pěti konstant jsou čtyři nezávislé a jsou funkcí objemového podílu vláken, počtu vrstev, orientace vrstev a celkového provedení. Zásadní vliv na vlastnosti kompozitu má objemový podíl vláken a matrice:

V_f - objemový podíl vláken

V_m - objemový podíl matrice

Pro ilustraci chování kompozitů uvedme základní výpočtové vztahy pro podélný a příčný směr.

3.1.1. Podélný modul pružnosti kompozitu

Pro podélně tahově namáhaný kompozit platí:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$$

kde ε_c - relativní přemístění kompozitu

ε_f - relativní přemístění vláken

ε_m - relativní přemístění matrice

Potom

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (1)$$

kde E_f - modul pružnosti vláken

E_m - modul pružnosti matrice

Vztah (1) je nazýván "směšovací pravidlo" a vyjadřuje vliv objemových podílů složek s různým modulem pružnosti na výsledný modul pružnosti kompozitu.

Příčný modul pružnosti kompozitu

Základní podmínka pro příčně tahově namáhaný kompozit má tvar:

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m$$

kde σ_c - napětí v kompozitu

σ_f - napětí vláken

σ_m - napětí matrice

Potom

$$\frac{1}{E_T} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (2)$$

3.1.2. Podélná pevnost kompozitu

$$\text{Pro } \varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m$$

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (3)$$

kde σ_f - napětí vláken

σ_m - napětí v matrici

Příčná pevnost kompozitu

$$G_{PC} = G_{PM} \cdot \frac{E_T}{E_m} \cdot (1 - V_f^{\frac{4}{3}}) \quad (4)$$

kde G_{PC} - příčná pevnost kompozitu

G_{PM} - příčná pevnost matrice

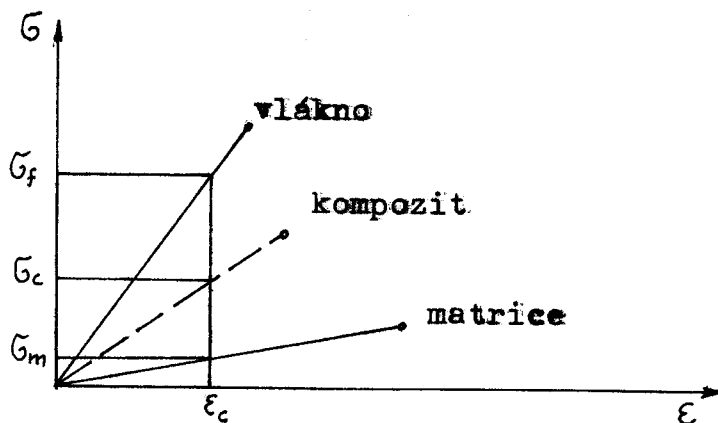
Elastické konstanty jsou spolu vázány vztahem :

$$V_{TL} \cdot E_L = V_{LT} \cdot E_T \quad (5)$$

Vztahy (1) ÷ (5) dávají pouze povšechnou představu o mechanismu chování kompozitu. Podrobnější údaje lze získat v literatuře /1/, kde je teorie dlouhovláknových kompozitů podrobně rozpracována včetně zmínek o různých nepříznivých vlivech jako je například vlhkost teplota apod.

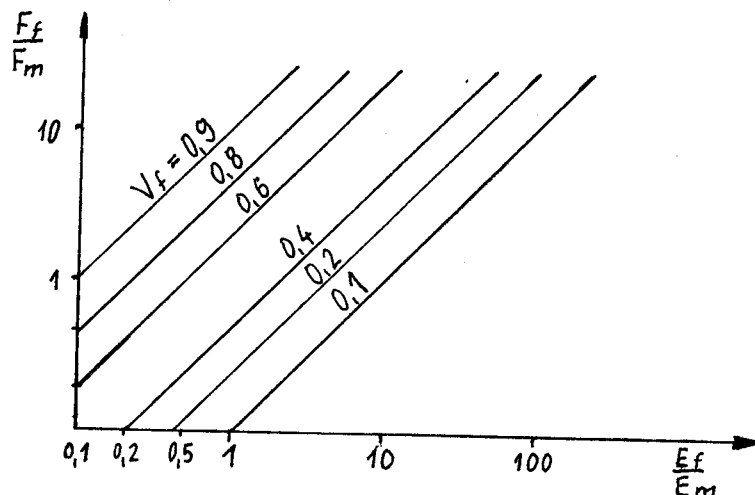
3.1.3. Mechanismus zatěžování

Poněkud názornější než uvedené vztahy jsou grafy a závislosti zachycující různé vlastnosti kompozitů, byť pouze kvalitativně. Například rozložení napětí kompozitu na jednotlivé složky ~~†~~ a lze zachytit takto:



Obr. 5. Rozložení napětí v kompozitu

Na obr.6. je zachycen poměr zatížení vláken a matrice jako funkce poměru jejich modulů pružnosti pro různé podíly objemového zastoupení vláken.



Obr.6 Poměr zatížení vláken a matrice

Například pro Grafitová vlákna v epoxidové matrici

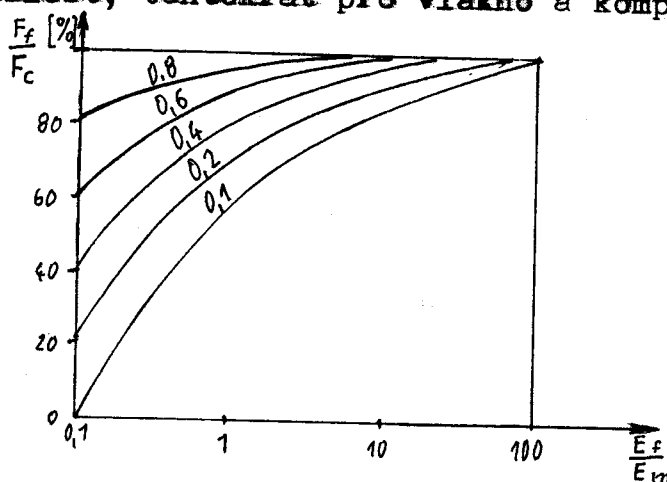
kde $E_f = 360$ GPa

$E_m = 3,6$ GPa

$V_f = 0,4$

je poměr zatížení $\frac{F_f}{F_m} = 6$, tedy vlákno přenáší šestkrát větší sílu než matrice.

Podobná závislost, tentokrát pro vlákno a kompozit je na obr.7 :



Obr.7. Poměr zatížení vláken a kompozitu

Pro stejný případ vlákna přenáší 90 % zátěže kompozitu.

3.2. Příklad výpočtu nosníku z kompozitů

Ve strojírenství všeobecně i v oblasti obráběcích strojů je obvyklým požadavkem nízká hmotnost při vysoké pevnosti a zejména vysoká tuhost konstrukcí. Jednou z možností zvyšování tuhosti konstrukcí bez podstatného zvýšení hmotnosti je použití kompozitních materiálů.

Předmětem výpočtu je skříňový nosník představující kupříkladu výložník, rameno manipulátoru, robotu, jeřábu apod., zpevněný nalepenými kompozitními pásky. Uspořádání nosníku a kompozitních pásek je zachyceno na obr.17. Toto uspořádání bylo zvoleno zejména proto, že tato aplikace je poměrně jednoduchá a v blízké budoucnosti použitelná i v našich podmínkách. Celokompozitní nosník skříňového typu (často ve formě trubky) se vyrábí navíjením vláken prosycených pryskyřicí na trn žádaného tvaru. Různé vlastnosti těchto nosníků se dosahují jednak různými vlastnostmi matrice a vláken, jednak různou orientací vrstev. Výpočty nosníků s různě orientovanými vrstvami jsou poměrně složité, využívají maticového počtu a výpočet konkrétní součásti (příruby, hnacího hřídele apod.) obvykle vede k některé z matematických metod (například k metodě konečných prvků), zpracování na počítači je potom zcela nezbytné. Takový výpočet nebylo možno provést v rozsahu této práce.

Naproti tomu výpočet nosníku z klasického materiálu vyztuženého kompozitními pásky je vcelku jednoduchý a je z něj zřejmá možnost využití kompozitů v praxi.

Obecně lze říci, že kompozity použijeme tam kde požadujeme vysokou tuhost konstrukce bez zvýšení hmotnosti, u pohybujících se součásti, kde využijeme zejména nízkou

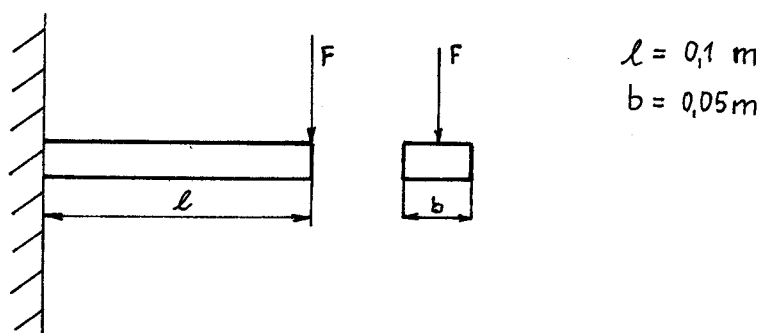
hmotnost kompozitů. Výsledkem těchto aplikací může být:

- zpřesnění výroby nebo manipulace způsobené zvýšenou tuhostí stroje či manipulátoru
- úspora energie dosažená snížením hmotnosti pohybujících se součástí nebo celých strojů
- menší opotřebení v důsledku snížení setrvačných sil

Vyztužovací pásek je tvořen vlákny (uhlíková, aramidová, kevlarová apod.) spojenými nevytvrzenou pryskyřicí. Po sejmutí krycí folie je možno jej nalepit na vyztužovanou součást a teplem vytvrdit. Takový pásek se nazývá Prepreg. K dvousměrnému vyztužení se používají rohože vytvořené z navzájem kolmých vláken - nazývají se Rowingy.

3.2.1. Výpočet čistě kompozitního nosníku

Než přistoupíme k výpočtu skříňového nosníku, uveďme ukázkový výpočet jednoduchého vetknutého celokompozitního nosníku s rovnoběžně uloženými vlákny i s překříženými vlákny uloženého dle obr.8.

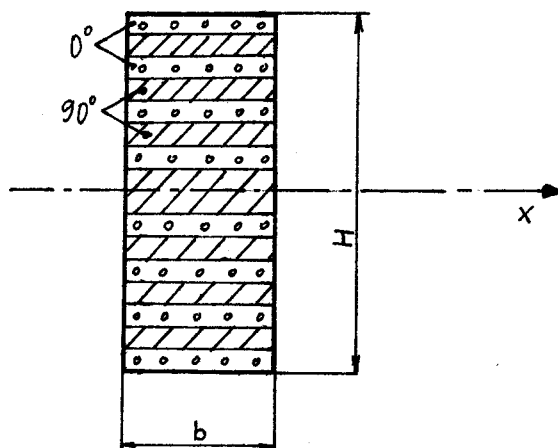


Obr.8. Vetknutý celokompozitní nosník

Pro výpočet budou uvažovány následující typy uložení vrstev kompozitu:

- A : $((0^\circ / 90^\circ)_4)_S$
 B : $((0^\circ / \pm 45^\circ)_4)_S$
 C : $(\pm 45^\circ)_S$
 D : $((0^\circ / \pm 45^\circ)_4)_S$
 E : jednosměrový kompozit

Způsoby zápisu uložení vrstev jsou popsány v /1/. Například zápis $((0^\circ / 90^\circ)_4)_S$ představuje toto uložení:



Obr. 9. Uložení vrstev kompozitu typu A

Písmeno S za závorkou značí symetrii kolem osy x, číslice 4 znamená počet takto označených vrstev.

Tuhost nosníku složeného z několika vrstev se vypočítá podle vztahu:

$$D_o = \frac{1}{3} b \sum_{k=1}^n (Q_{11})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (6)$$

b - šířka nosníku

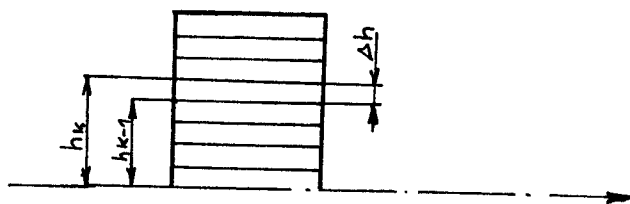
h_k - výška k-té vrstvy

Q_{11} - tuhost vrstvy

kde $Q_{11} = \frac{E_L}{1 - \nu_{TL} \nu_{LT}} \quad (7)$

Pro výpočet byl uvažován materiál Thornel 300 vyztužený uhlíkovými vlákny uloženými ve vrstvách dle obr.10. Materiál je charakterizován těmito údaji:

objemový podíl vláken	$V_f = 63 \%$
hustota kompozitu	$\rho = 1610 \text{ kg/m}^3$
podélný modul pružnosti	$E_l = 159 \text{ GPa}$
příčný modul pružnosti	$E_r = 11 \text{ GPa}$
hlavní Poissonovo číslo	$\nu_{lr} = 0,045$
vedlejší poissonovo číslo	$\nu_{rl} = 0,003$
tloušťka vrstvy	$\Delta h = 0,125 \text{ mm}$



Obr.10. Uložení vrstev kompozitu

Pro potřeby výpočtu nejprve vypočteme tuhosti jednotlivých vrstev Q_{11} . Vzhledem k nízkým hodnotám Poissonových čísel, po dosazení do vztahu (7) dostaneme chybovou tuhost přibližně rovnou modulu pružnosti v příslušném směru. Modul pružnosti natočených vrstev se vypočítá podle vztahu 4.58 z /1/.

Tuhosti jednotlivých vrstev:

0°	$Q_{11} = 159,5 \text{ GPa}$
45°	$Q_{11} = 16,1 \text{ GPa}$
90°	$Q_{11} = 11,0 \text{ GPa}$