



Nové možnosti rozvoje vzdělávání na Technické univerzitě v Liberci

Specifický cíl A3:Tvorba nových profesně zaměřených studijních programů

NPO_TUL_MSMT-16598/2022



Předmět: Řízení projektů

Přednáška č. 6: Kompozity

doc. Ing. Pavlína Hájková, Ph.D.

Cíl přednášky

Cílem přednášky je seznámit studenty s kompozitními materiály, s jejich výskytem v přírodě a především s kompozity vyrobené člověkem. Studenti se seznámí se základními vlastnostmi kompozitů, jejich rozdělením dle použité matrice a výztuže a s aspekty ovlivňujícími jejich kvalitu.

Obsah

1. Úvod
2. Charakteristika kompozitů
3. Dělení kompozitů
4. Příprava kompozitů
5. Částicové kompozity
6. Vláknové kompozity
7. Rozhraní
8. Použití kompozitů
9. Prepregy

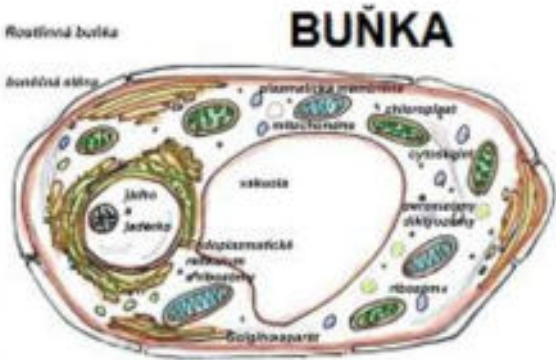
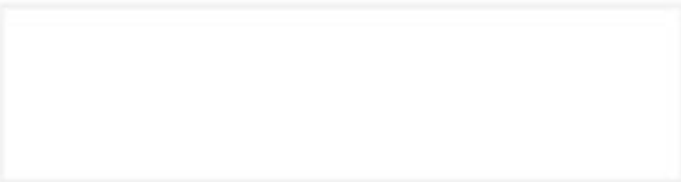
Co je kompozit?

= **SLOŽENÝ MATERIÁL** ze dvou, nebo více substancí - ve kterém jsou obě složky významně zastoupeny (min. 5 obj.%) - s rozdílnými vlastnostmi, které **dohromady dávají výslednému výrobku nové vlastnosti, které nemá sama o sobě žádná z jeho součástí.**

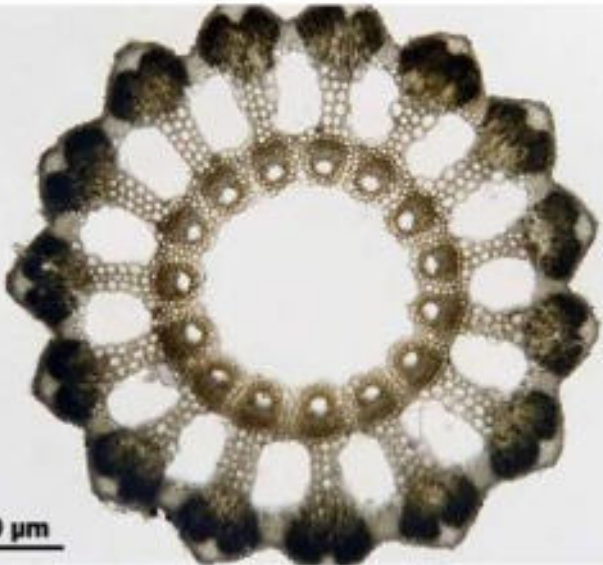
- Vhodným výběrem materiálu matrice a zpevňující fáze a volbou jejich vzájemného objemového poměru lze dosáhnout neobvyklých vlastností

Přírodní kompozity

1. PŘÍRODA



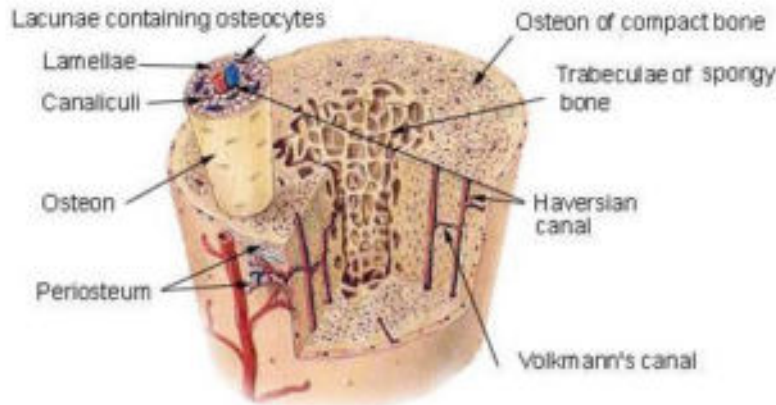
BAMBUS



500 μm

PŘESLIČKA
DŘEVO

Compact Bone & Spongy (Cancellous Bone)



EGYPT 2700 let př. n. l.



- Kompozity jsou známy od starověku - již před tisíciletími se používaly kompozitní materiály jako papír, slaměné cihly, ...).



NEPÁLENÉ CIHLY

jílovité hlíny s příměsí plev, slámy, vepřových štětín...sušené na slunci,
9 000 let př. n. l. v Palestině.

ŽELEZOBETON

Beton +
ocelové tyče
1867



V současnosti jde o konstrukční materiály vzniklé smísením složek, s nízkou specifickou hmotností, s vysokou pevností, tuhostí, odolností proti abrazi apod.



https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:V%C4%9Btrn%C3%A1_elektr%C3%A1rna.JPG

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:WindPropBlade.jpg>

<https://cs.wikipedia.org/wiki/Snowboard>



c 59 limited

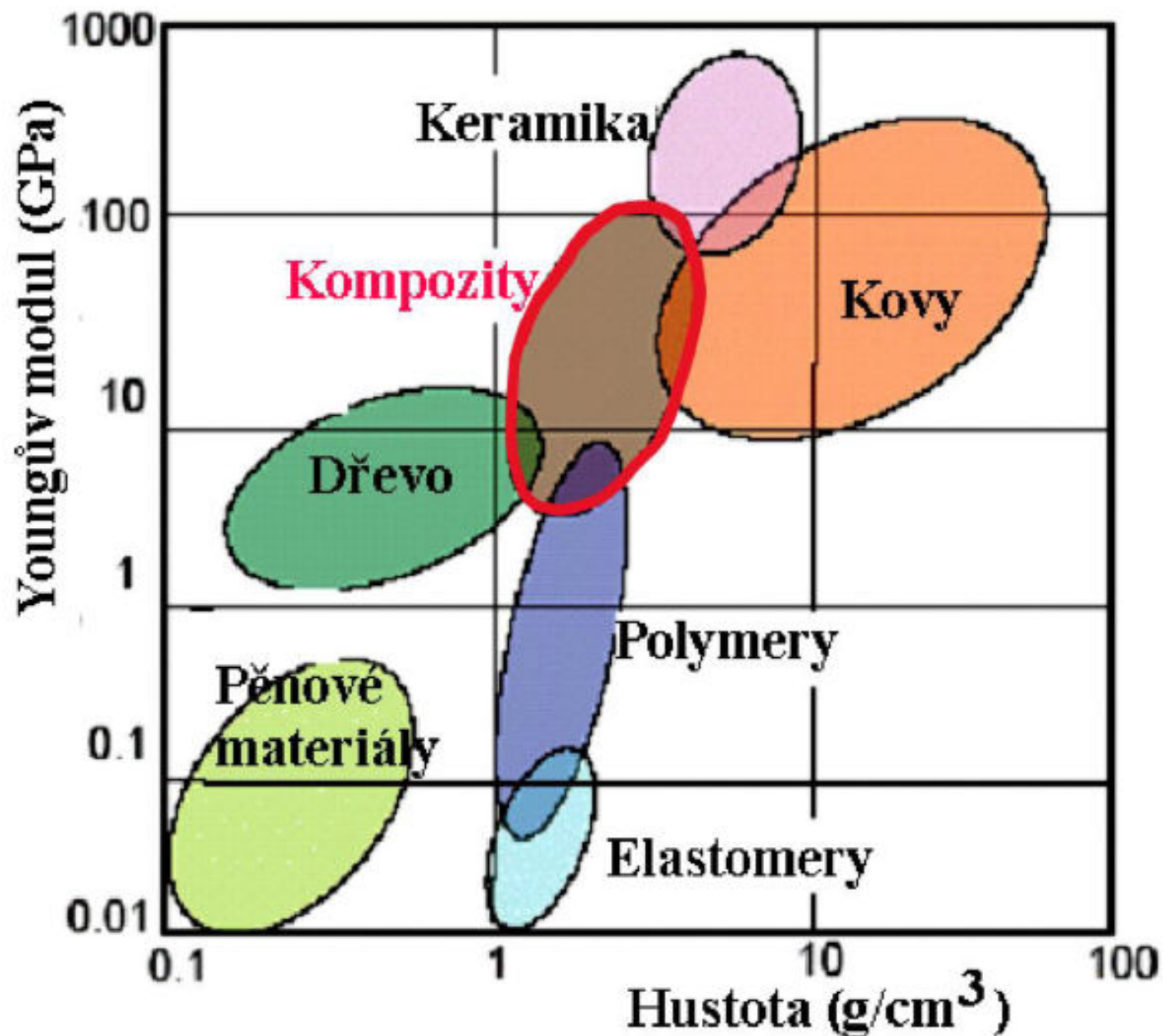


<http://www.skyleader.aero/wp-content/uploads/2017/09/skyleader-GP-one-1000x550.png>

<https://twohubs.blogspot.com/2013/02/colnago-c59-limited-edition-complete.html>

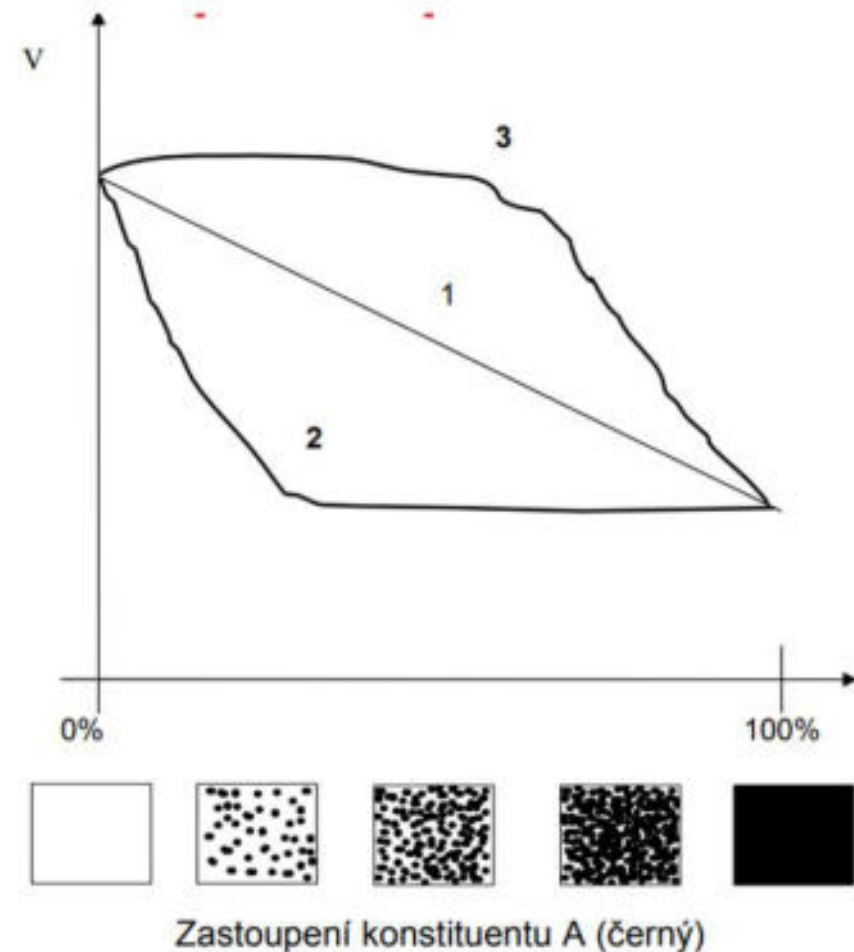
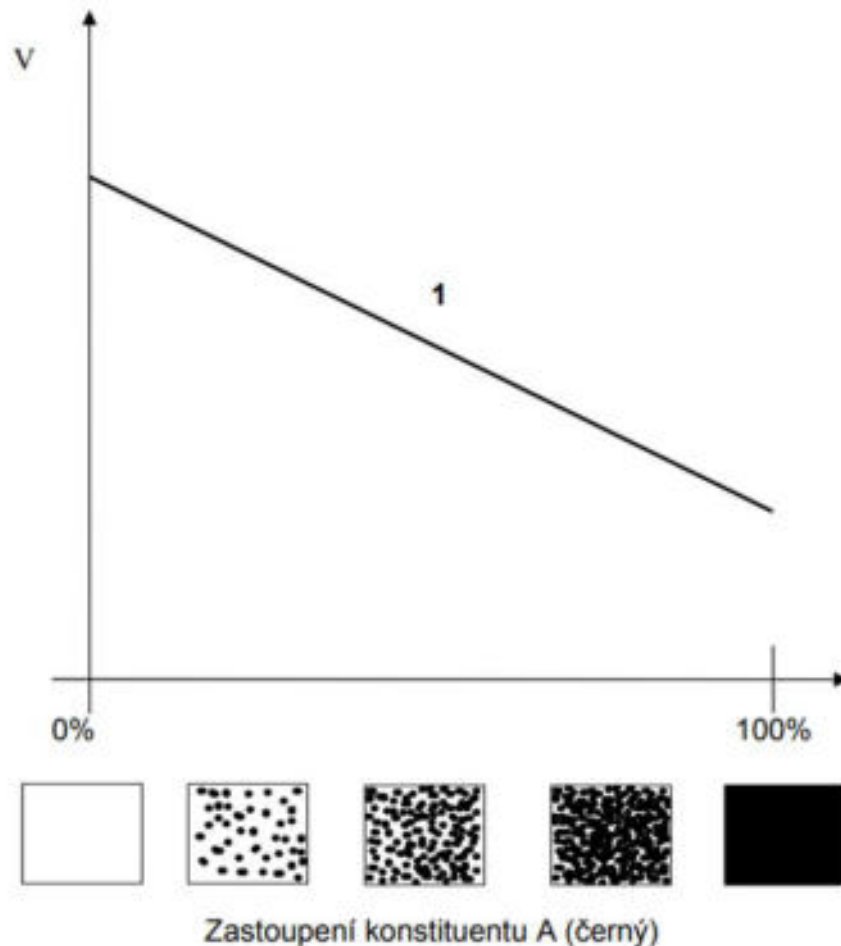
https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/37913/mina%C5%99%C3%ADk_2016_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Tuhost a objemová hmotnost materiálů



Výhoda kompozitů

- VYNIKAJÍCÍ MECHANICKÉ VLASTNOSTI
- VLASTNOSTI VÝSLEDNÉHO KOMPOZITU JSOU LEPŠÍ NEŽ POUHÝ SOUČET VLASTNOSTÍ JEDNOTLIVÝCH SLOŽEK = **SYNERGICKÝ EFEKT**
- VLASTNOSTI „NA MÍRU“



Nevýhoda kompozitů

RECYKLACE!!!

- Velmi problematická
- Nákladná
- neekonomická

PROBLEMATICKÉ OPRAVY

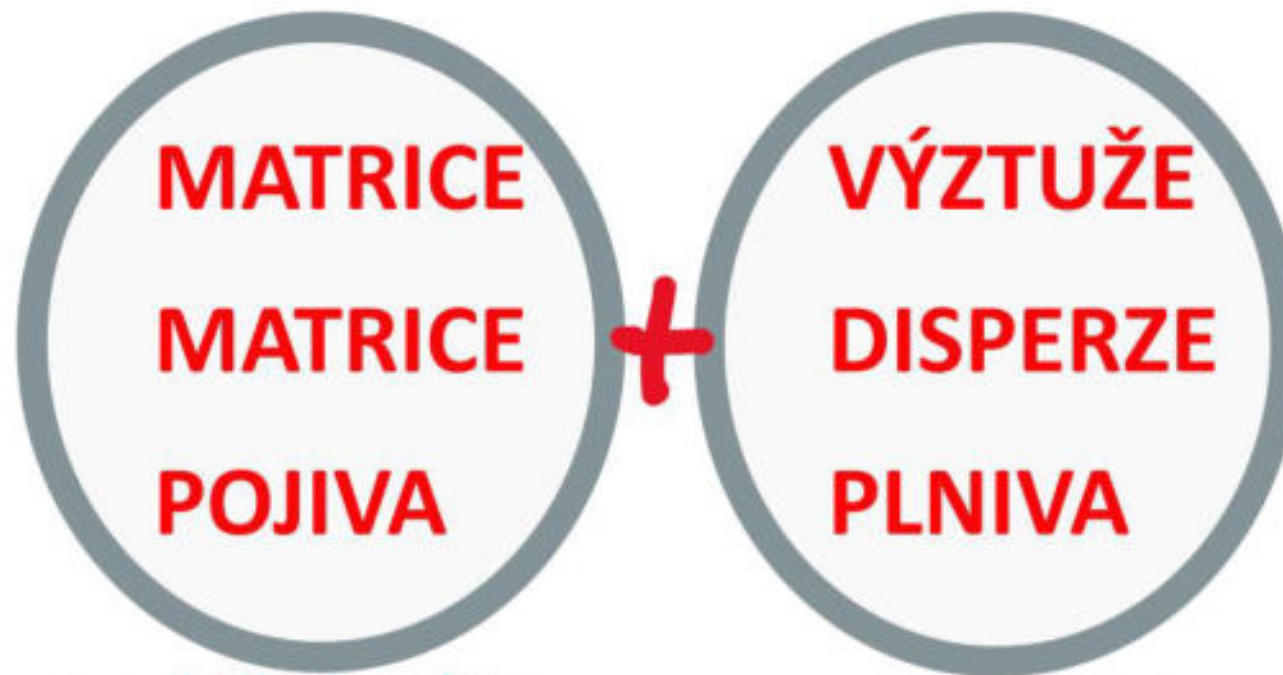


Charakteristika kompozitů

- Většina kompozitů je tvořena pouze dvěma fázemi - matricí, která je spojitá a ve které je uložena dispersní fáze. Může být ale i více disperzních fází – hybridní kompozity
- Vlastnosti kompozitů určují vlastnosti fází, které je tvoří - tj. relativní množství a geometrie fází (složek).
- Kompozit je vytvářen k tomu, aby se dosáhlo co nejlepších mechanických vlastností (pevnosti a houževnatost za normálních, ale i zvýšených teplot).

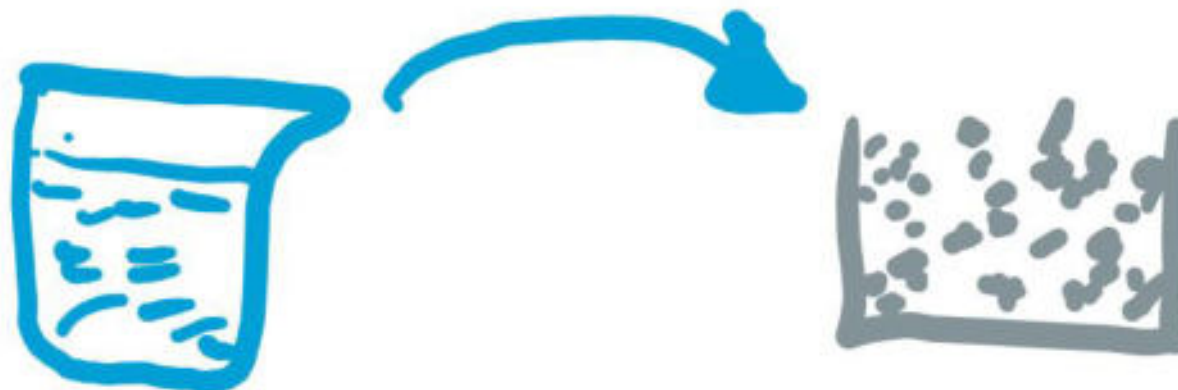
Složení kompozitů

➤ Složený z



spojitá obvykle
poddanější fáze

tvrdší, tužší, pevnější
nespojité fáze



Dělení kompozitů

Podle materiálu matrice:

- **PMC = s polymerní matricí** - Polymer Matrix Composite
- **CMC = s keramickou matricí** - Ceramics Matrix Composite (sem započítáme i skleněné matrice)
- **MMC = s kovovou matricí** - Metal Matrix Composite

- **s anorganickou matricí** (sířany, silikáty) a **jejich kombinace** (beton z portlandského cementu, geopolymery...) – možno počítat do CMC
- **Pěnové materiály**

Dělení kompozitů

Podle struktury nebo charakteristiky výztuže:

disperzní (disperzní zpevněné kovy)

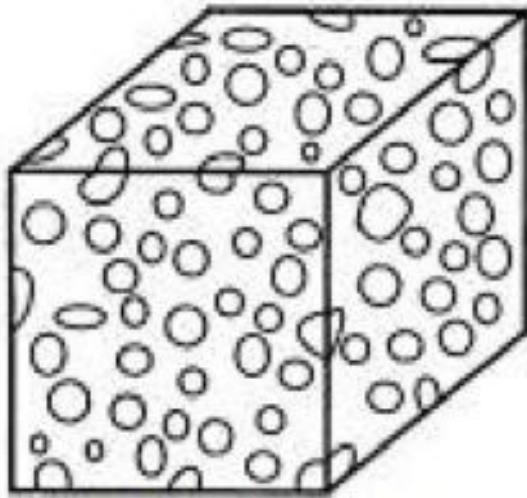
částicové

- **pravidelných tvarů** (koule, destičky)
- **nepravidelných tvarů**
- **s plynnými inkluzemi** (lehčené polymery, pěnobeton)

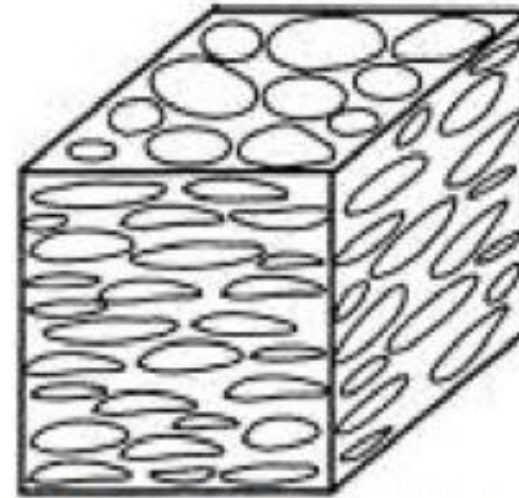
vláknové

- **s dlouhými vlákny** – rowingy, technické textilie
(skleněná, uhlíková, polymerní)
- **s krátkými vlákny** – sekaná vlákna, netkané textilie
(uhlíková, wolframová, azbestová)

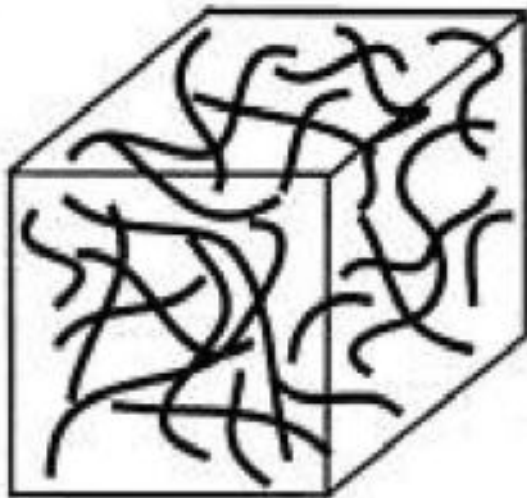
Složení kompozitů



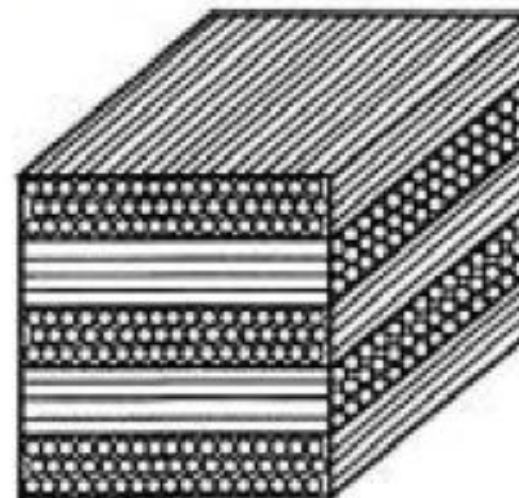
Zrnitý kompozit 3D



Zrnitý kompozit s usměrněnou strukturou 2,5D



Vláknitý kompozit bez orientace



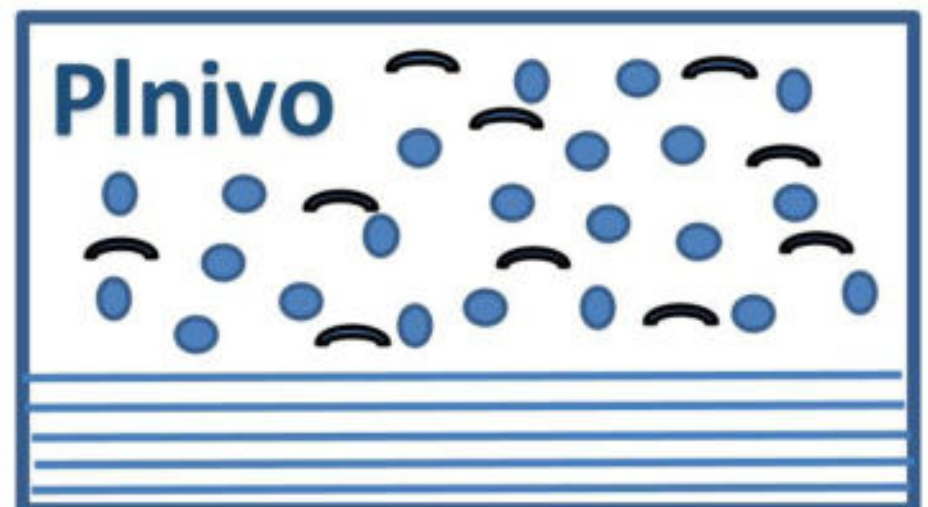
Laminát

Příprava kompozitů

Pojivo

Plnivo

= KOMPOZIT

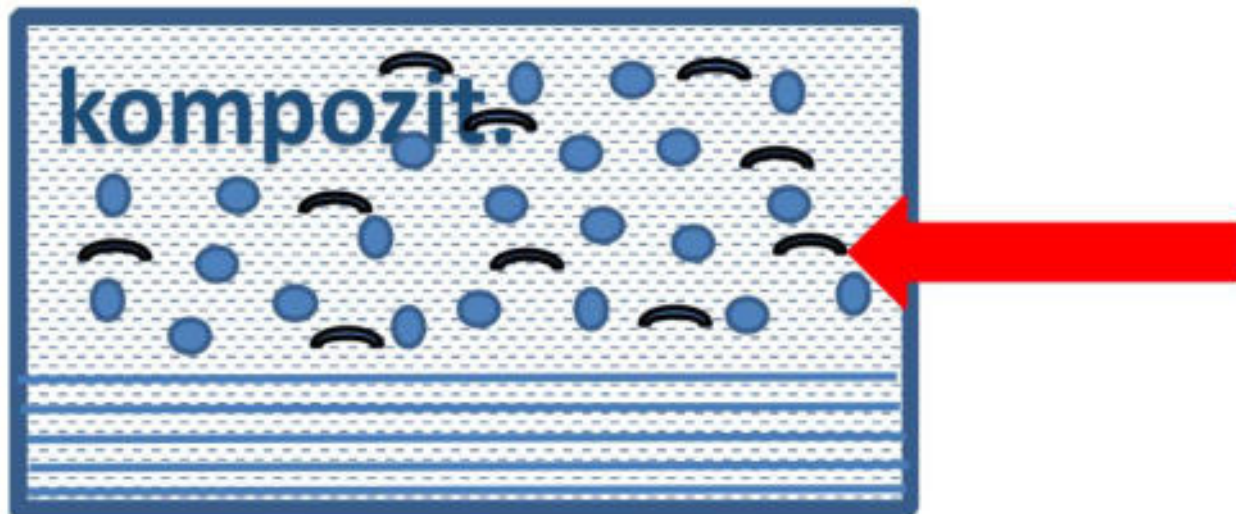


Příprava kompozitů

Pojivo

Plnivo

= KOMPOZIT



Částicové kompozity

Různé tvary, aspektní (štíhlostní d/l) poměr



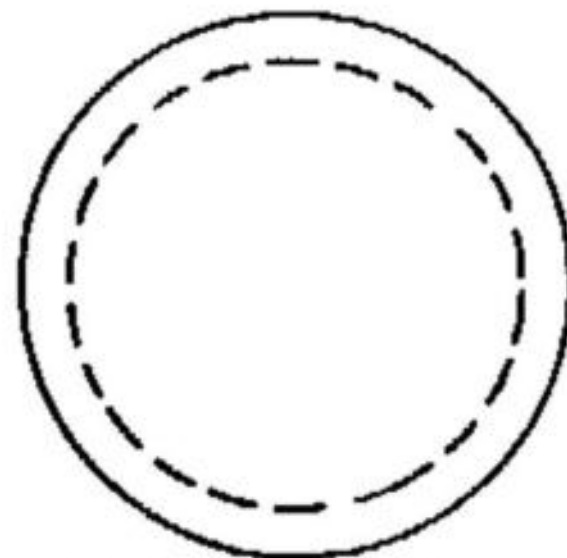
Ca CO₃
 $l/d = 1$



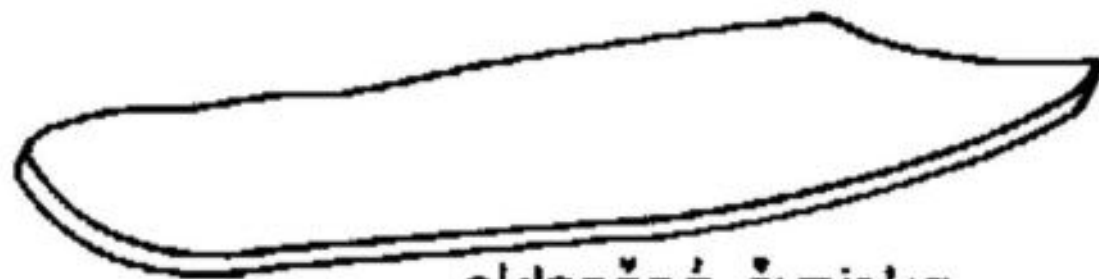
mastek
 $l/t = 10$



mikromletá slída
 $l/t = 100 - 200$



dutá skleněná
kulička $l/d = 1$



skleněná šupinka
 $l/t = 60 - 100$



whisker SiC $l/d = 100 - 200$

Částicové kompozity

Příklady

GEOPOLYMERY (bude extra přednáška)

Stavební materiály – beton... (bude extra přednáška)

Slinuté karbidy:

tvrdé částice uložené v kovové matici.

Tvrdá složka - částice karbidu wolframu o vysoké tvrdosti, tuhosti a teplotě tání (popř. částice karbidu titanu) uloženy v houževnaté matici kobaltu.

Při otupení destičky dojde k vylomení částice karbidu a odhalí se nové ostré částice.

Brusiva:

Brusné kotouče obsahují tvrdé částice Al_2O_3 , SiC, kubického nitridu boru atd. umístěné v houževnaté polymerní matici.

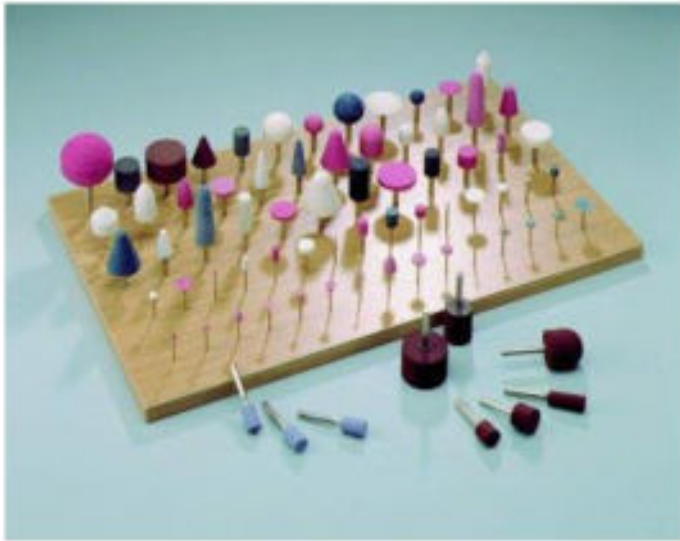
Slinuté karbidy

<https://www.proexportplus.com/Produkty/REZNE-NARADI/Britove-desticky>
<http://educom.tul.cz/educom/inovace/TOB/SOUSTRUZ.pdf>
<https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/obrabeni/soustruzeni/soustruznicke-nastroje-podelne-kobrabeni-ploch/vymenitelne-britove-desticky-pro-soustruznicke-nastroje-podelne-kobrabeni-ploch/snmg-120408/p/251356#lightboxPdp>
<https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting-tool-materials>



Brusné materiály

<https://www.prokovmorava.cz/brousici-teliska-na-stopce>

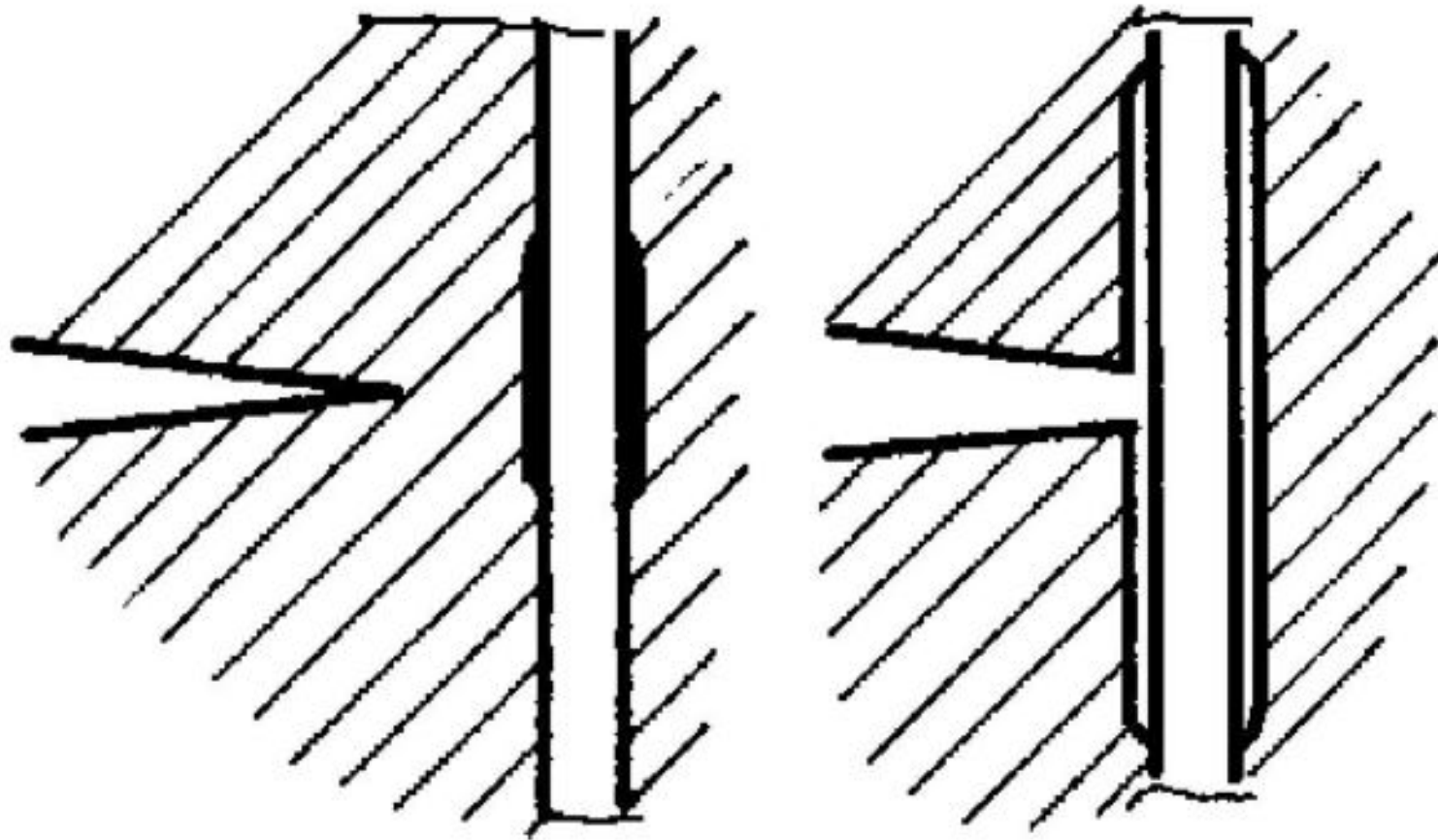


Vláknové kompozity

- Negativní mechanické vlastnosti složek se u výsledného materiálu již neprojeví.
- Například kompozit obsahující křehká vlákna uložená v křehké matrici má dobrou odolnost proti křehkému lomu.
- Oproti homogennímu materiálu mohou být poruchy vláken i matrice četnější a přesto nevedou ke katastrofickému lomu.
- Příčinou je odlišný mechanismus šíření poruch. Při šíření trhlin v matrici ve směru kolmém k ose vlákna dochází k otupování jejich čel. Trhlina se po interakci s vláknem šíří v mezifázovém rozhraní.

Vláknové kompozity

Mechanismus interakce trhliny matrice s vláknem



Vláknové kompozity

Vlákná:

Kovová - drátky z vysokotavitelných kovů - W, Mo

Skleněná - sklovinu tvoří přechlazená tavenina směsi oxidů Si, Al, Ca, B, Mg

Uhlíková - vyráběná z vláken polyakrylonitrilu, ropných smol nebo celulózových vláken

Čedičová - Výrobní technologie se zakládá na tavném zvlákňování čediče při teplotě 1500-1700 °C

Keramická - na bázi Al₂O₃

Polymerní - aromatické polyamidy (kevlar = **aramid**), ultravysokomolekulární polyetylén, LCP kopolyestery

Vláknové kompozity

Vlákna:

Kovová - drátky z vysokotavitelných kovů - W, Mo

VÝZTUŽ	HUSTOTA [kg.m ⁻³]
Skleněná vlákna	2490 ÷ 2540
Uhlíková vlákna	1800 ÷ 2200
Aramidová vlákna	1440

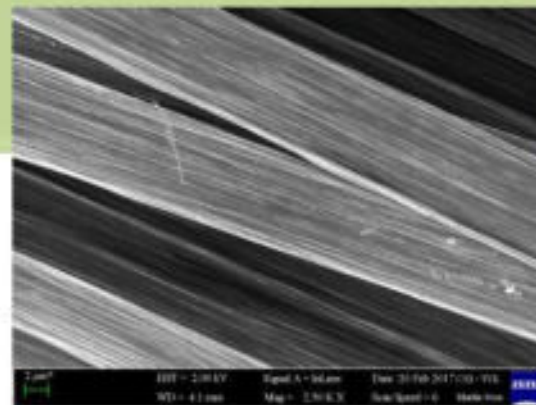
Keramická - na bázi Al₂O₃

Polymerní - aromatické polyamidy (kevlar = aramid), ultravysokomolekulární polyetylén, LCP kopolyestery

Vláknové kompozity

Vlákna:

Sekaná



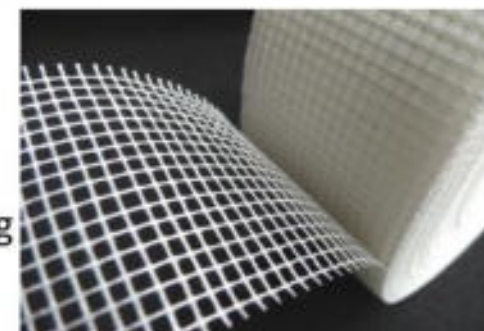
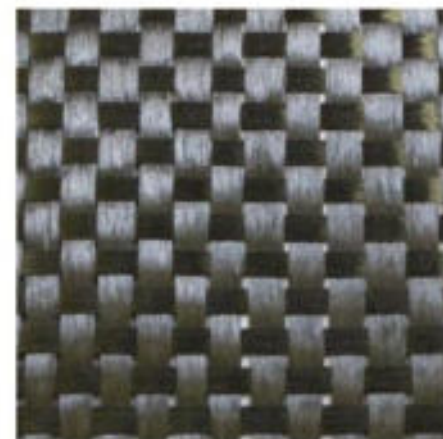
Rovingy

Netkané textilie



Tkané textilie – plátňová, keprová
atlasová vazba (bude v jiné přednášce)
polyetylén... - *anizotropní vlastnosti*

Sítě – uhlík, čedič, sklo



https://carbonfiber.cz/cdn/shop/products/IMG_6258_1024x1024@2x.jpg?v=1681897419

<https://www.havel-composites.com/uploads/images/products/2033/756x570/uhlikovy-roving.jpg>

<https://www.geomall.cz/temp/img/ne/netkana-polyesterova-geotextilie-geo-rpes-w800-h600-253d8a61ab3ca57729d439776ceb7ab0.jpg>

Vláknové kompozity

Matrice:

Polymerní matrice – reaktoplast (např. nenasycený polyester, **epoxid**), termoplast (např. polypropylen, polyamid, polykarbonát) nebo zesíťovaný elastomer (styren-butadien, akrylonitril-butadien).

Kovová matrice - lehké slitiny hliníku, hořčíku, titanu, ale i slitiny železa, kobaltu a mědi.

Keramická matrice - karbid a nitrid křemíku, oxidy křemíku a zirkonia, geopolymery

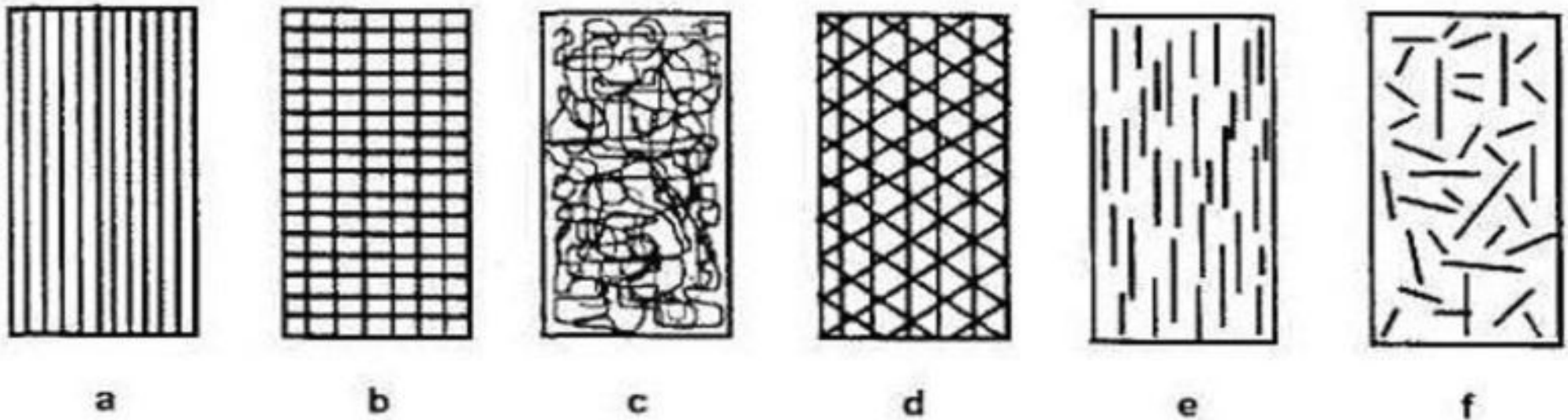
Uhlíková matrice - uhlík v různém stavu strukturní uspořádanosti. Sekundární vyztužující fázi jsou uhlíková vlákna (Brzdové kotouče)

Vláknové kompozity



<https://www.fiberplast.sk/images/dlazba/atyp.jpg>

Vláknové kompozity



(a) jednosměrně uspořádanými

(b) dvouose orientovanými ve tkané výztuži (výztuž v podobě tkaniny)

(c) nahodile orientovanými vlákny (výztuž v podobě netkané textilie tj. rohože)

(d) s víceosou výztuží

(e) kompozit s krátkými (diskontinuálními) vlákny, jednosměrná orientace

(f) kompozit s krátkými vlákny, nahodilá orientace

Vláknové kompozity

Příklady kompozitů s vyztužujícími vlákny

- **Vyztužený beton**
- **Pneumatiky** výztuž za studena tažený ocelový drát (nebo nylonová, kevlarová vlákna).
- **Sklolaminát** skleněná vlákna uložená v polymerní matrici. Skleněná vlákna se pokrývají některými organickými povlaky.
- **Carbonový laminát**
- **Kompozity zpevněné vlákny s kovovou matricí**

Mají široké uplatnění při výrobě draků letadel i potahů křídel. (Al-B, Mg-B, Al-SiC).

Žárupevné kompozity - matrice ze slitiny Ni, vlákna - wolframová.

Vláknové kompozity

Příklady kompozitů s vyztužujícími vlákny



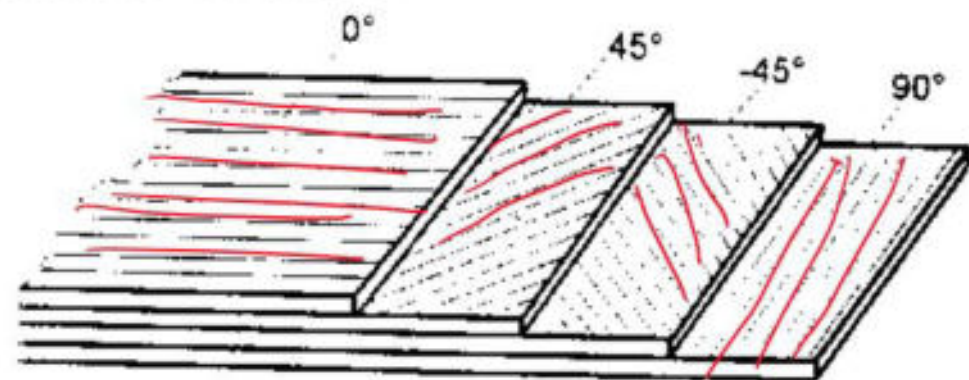
ŘEZ PNEUMATIKOU

- 1/ TĚLO PNEUMATIKY
- 2/ KORDOVÁ TKANINA
- 3/ OCELOVÁ VÝZTUŽ
- 4/ KORDOVÁ KOSTRA



Vláknové kompozity - lamináty

- Potřebná tloušťka stěny kompozitních výrobků vyztužených kontinuálními vlákny se obvykle vytváří vrstvením elementárních vrstev.
- Při jednosměrné orientaci vrstvy, jsou mechanické a fyzikální vlastnosti laminátu značně závislé na orientaci vrstev - silně anizotropní.
- Laminát se stává plošně izotropní (tj. modul pružnosti a pevnost v rovině laminátu jsou ve všech směrech stejné) až při skladbě vrstev
[0°/+45°/-45°/90°]



Výroba laminátů



Výroba laminátů



Výroba laminátů



Výroba laminátů



Výroba laminátů



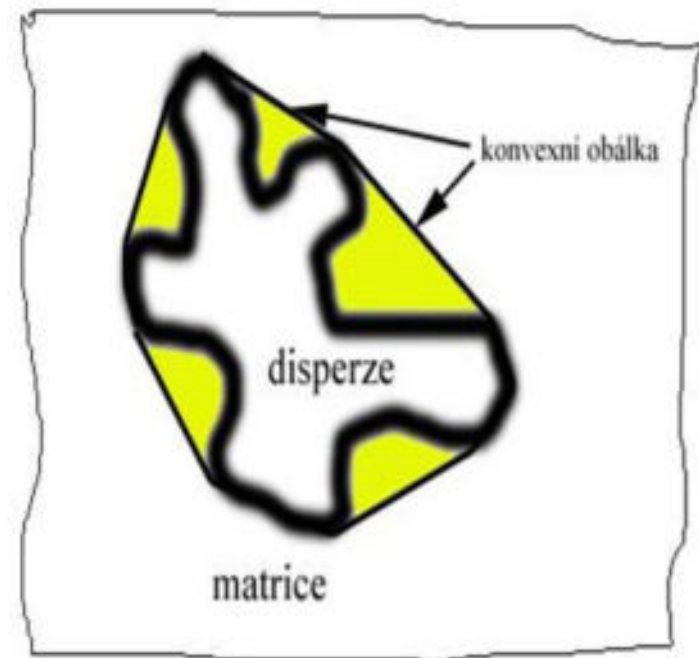
ROZHHRANÍ

- Mezi fázemi v kompozitu jsou rozhraní – mezifázové povrchy. Možné vazby na rozhraní :
 - **Mechanická vazba**
 - **Fyzikální vazba**
 - **Chemická vazba**

Mechanická vazba

= mechanické zaklínění – záleží
na složitosti povrchu

Žluté části matrice
drží částici na jejím místě



- Konvexní obálka
 - jako bychom částici obklopili gumou
- Měřítko mechanického zaklínění
 - velikost povrchu částice dělená velikostí povrchu konvexní obálky
- Proto nemají být částice a vlákna zcela hladká

Fyzikální vazba

Působí na vzdálenosti 0,3 až 0,5 nm

- **Její teoretická pevnost je 0,7 až 7 GPa**
- Úzce souvisí se **smáčivostí obou materiálů**
- Dá se vyjádřit povrchovým napětím nebo povrchovou energií
- Je-li možná vzájemná difuze, vytváří se silněji vázaná difuzní mezivrstva
 - bor v oceli
- U difuzního spojení je nebezpečí, že se malé částice disperze zcela rozpustí - zmizí

Chemická vazba

Vzniká tehdy, jestliže matrice a disperze spolu mohou chemicky reagovat

- Vytváří se mezivrstva chemické sloučeniny s chemickou vazbou
- Možnost, že celá disperze zreaguje
- disperze tím ale nezmizí
- **Chemické vazby působí na vzdálenost 0,1 až 0,3 nm**
- **Jejich teoretická pevnost je 7 až 70 GPa**

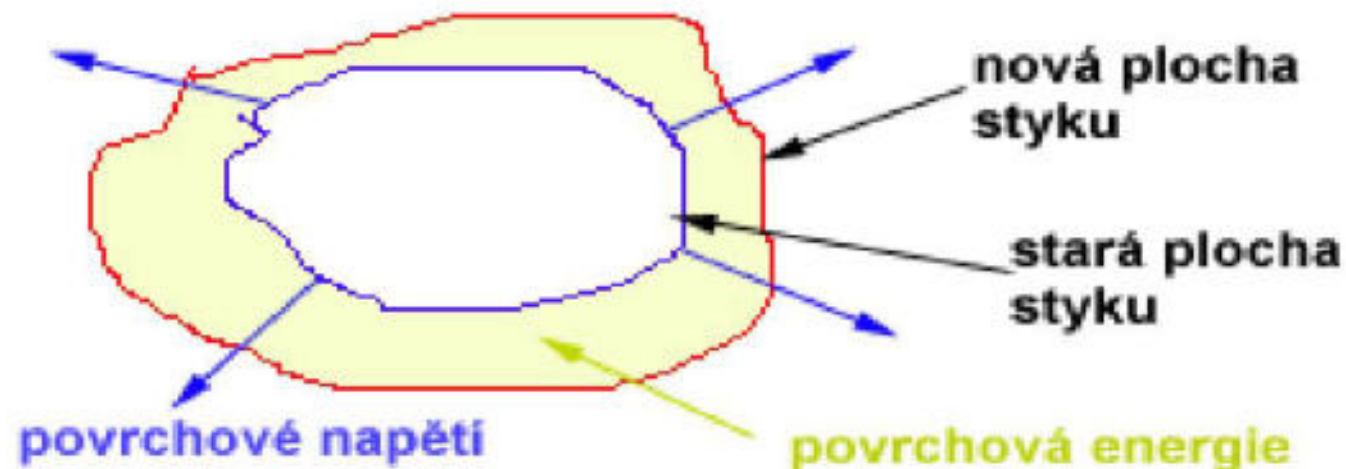
Příčiny špatné soudržnosti



- Jak je patrné, vazební síly na rozhraní jsou dostatečně velké, pokud nejsou narušené :
- Nedostatečné smáčení – povrchy nejsou v účinné vzdálenosti, nebo jen část
- Nedostatečně čistý povrch – mastnota, oxidy
- Pnutí na rozhraní – důsledek různé tepelné roztažnosti a fázových přeměn
- Hlavní roli hraje vzájemná smáčivost

Smáčivost – základní pojmy

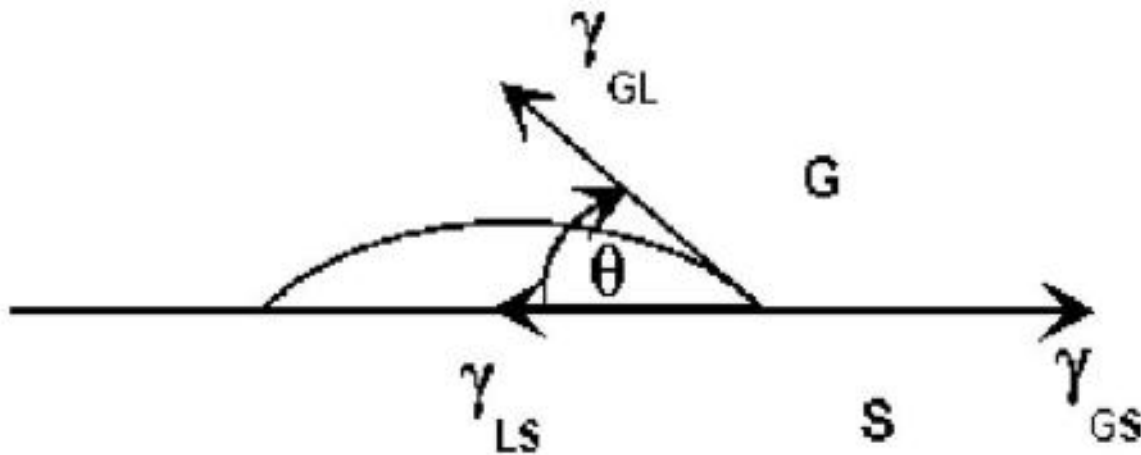
- Povrchové napětí – síla, potřebná ke zvětšení obvodu povrchu o jednotku γ [N/m]
- Povrchová energie – energie, potřebná ke zvětšení plochy povrchu o jednotku E [J/m²]
- Obě veličiny jsou si číselně rovny (ale ne typ)
- Základní rovnováha pro smáčení povrchu : G – okolní plyn, S – pevná látka, L – smáčeující kapalina



Smáčení na rozhraní

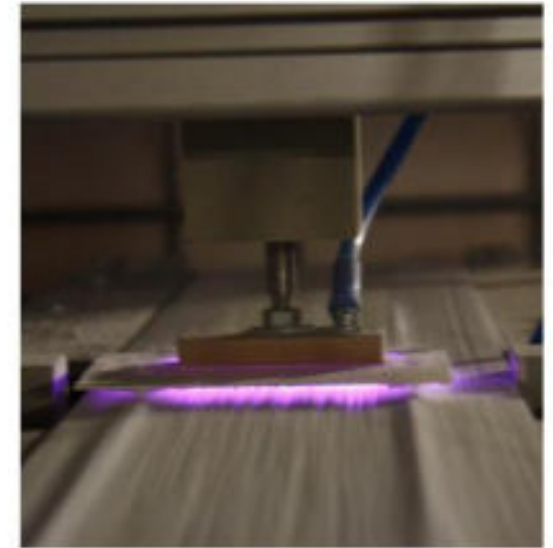
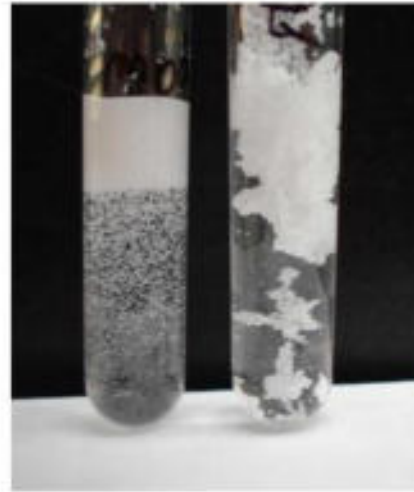
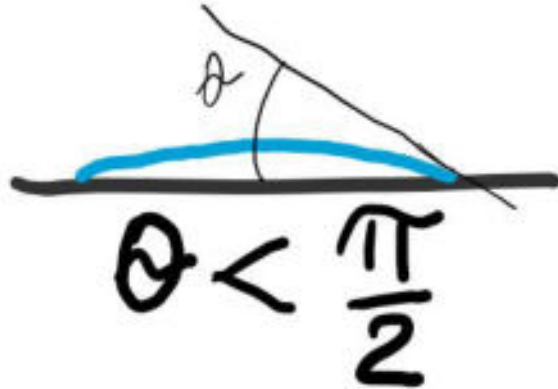
- S je povrch disperze
- L je kapalná matrice
- G je okolní plynné prostředí
- Silová rovnováha:

$$\gamma_{GS} = \gamma_{LS} + \gamma_{GL} \cos \theta$$

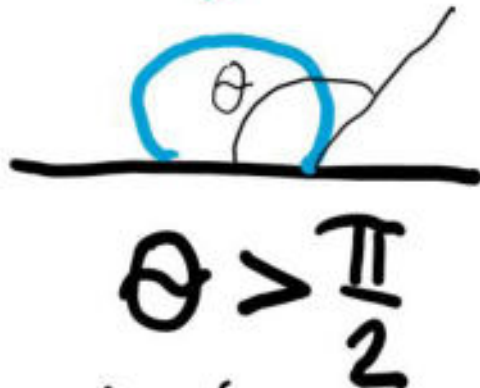


Smáčení na rozhraní

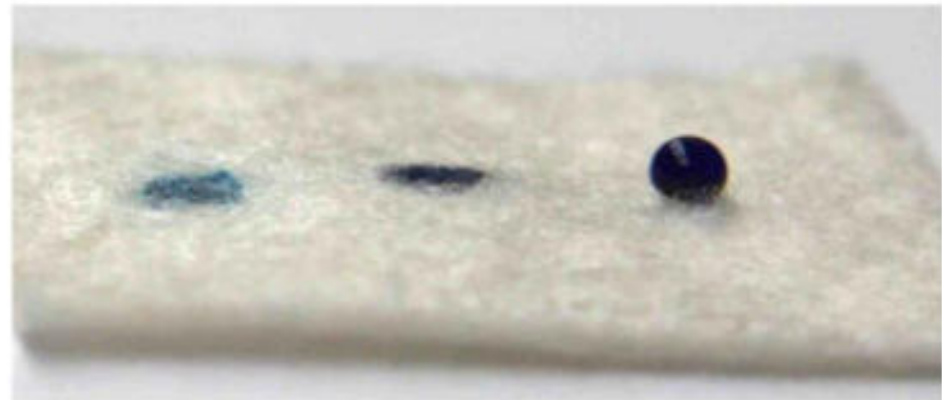
SMÁČIVÝ POUVRCH = VYSOKÁ ENERGIE POUVRCHU
= hydrofilní



NESMÁČIVÝ POUVRCH = NÍZKÁ ENERGIE POUVRCHU
= hydrofobní



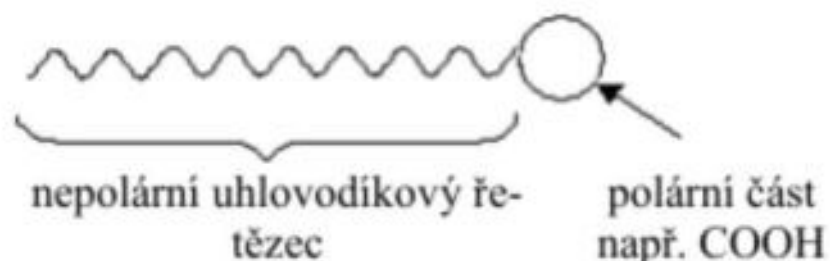
(plasty)



Vliv chemického složení na povrchu

Polární – např. navázané OH vazby - hydrofilní

Nepolární – např. PTFE - hydrofobní



velká molekula organická
s polárně-nepolární strukturou
např. stearová kyselina,
 $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$

Schéma organické látky
s polárně-nepolární strukturou

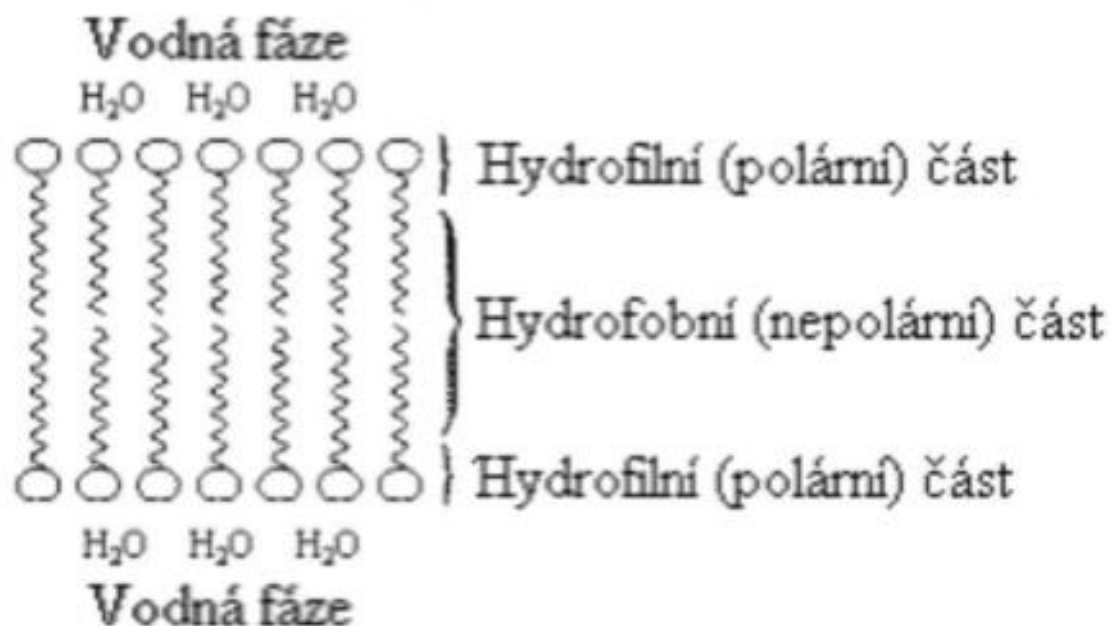
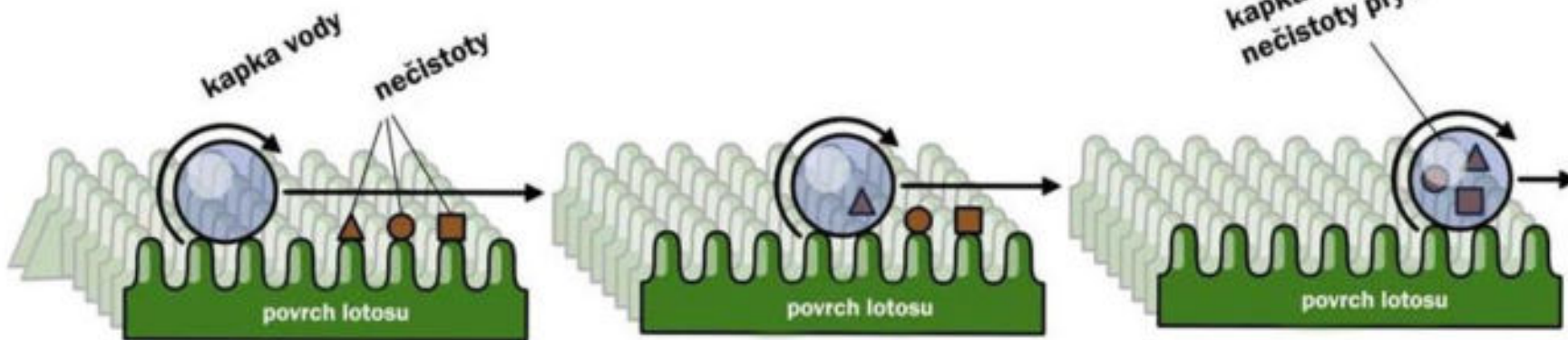
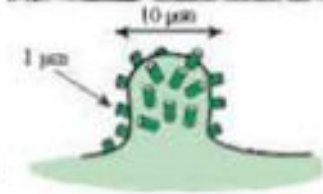
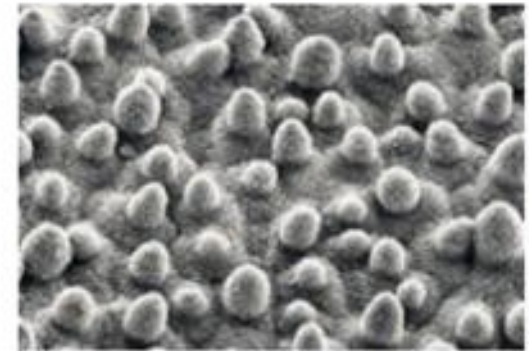


Schéma řezu dvouvrstevnou buněčnou membránou

Vliv morfologie povrchu - drsnosti

- Faktor drsnosti $D = \text{skutečný povrch} / \text{ideální povrch}$, vždy $D > 1$
- **Smáčivé** - drsnost zlepšuje adhezi
- **Nesmáčivé** - drsnost zhoršuje adhezi

Příklad aplikace - pokyny pro lepení :
smáčivá lepidla - plochu spoje zdrsnit
nesmáčivá lepidla - plochu spoje vyhladit



Použití kompozitů

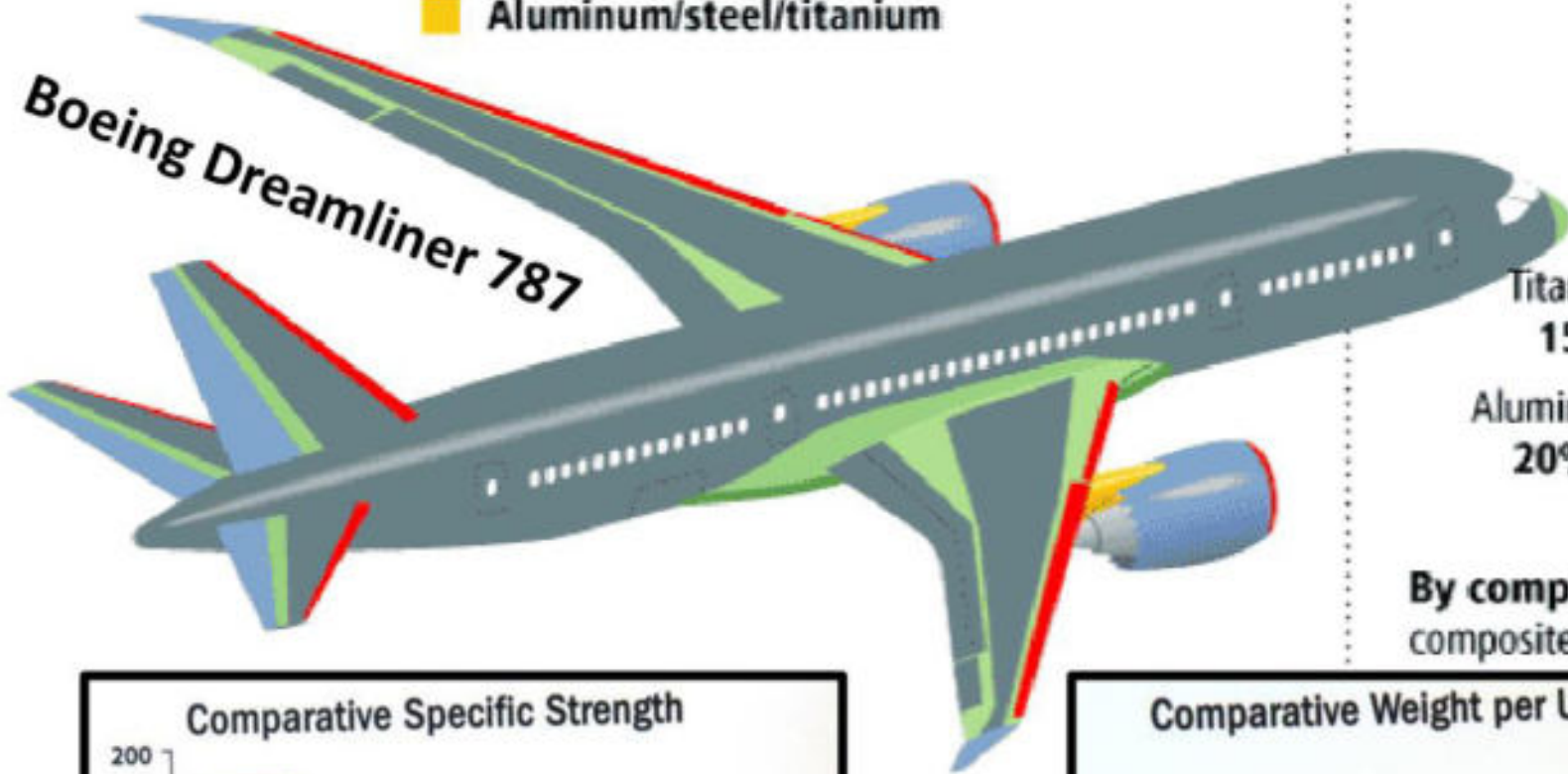
- Dopravní průmysl – letadla, lodě atd.
- Sportovní výrobky – lyže, snowboardy, kola, ochranné helmy, hole, hokejky...
- Stavební průmysl – železobeton, laminátové podlahy..
- Strojírenství
- Vesmírný program

Kompozity v letectví

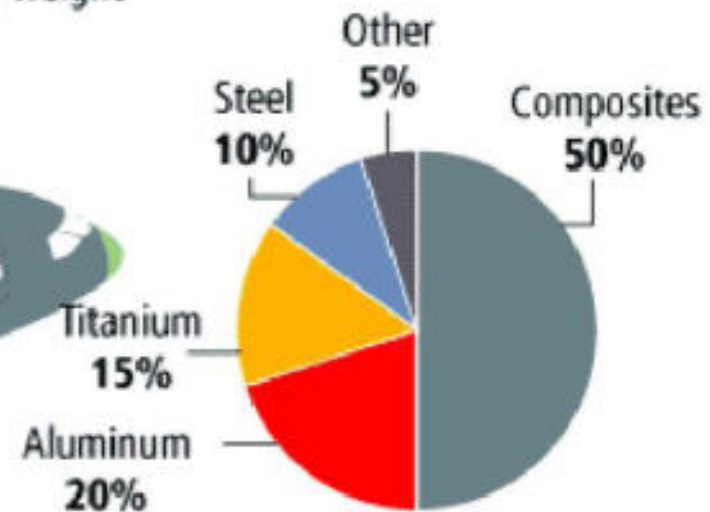
Materials used in 787 body

- Fiberglass
- Aluminum
- Carbon laminate composite
- Carbon sandwich composite
- Aluminum/steel/titanium

Boeing Dreamliner 787

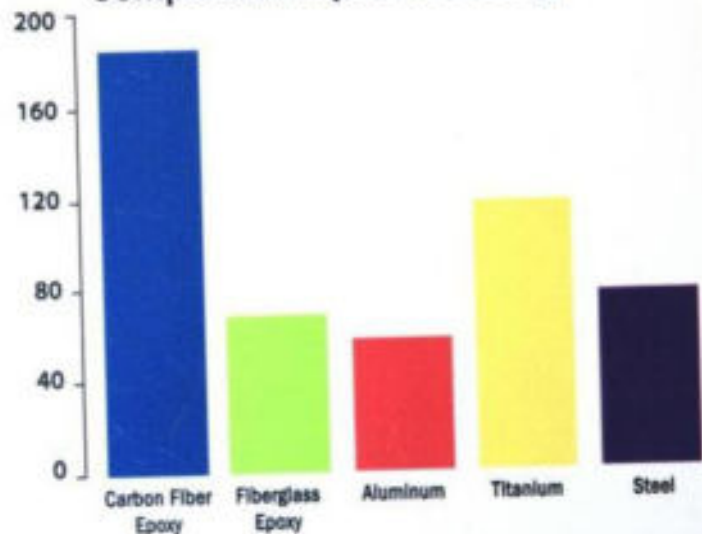


Total materials used By weight

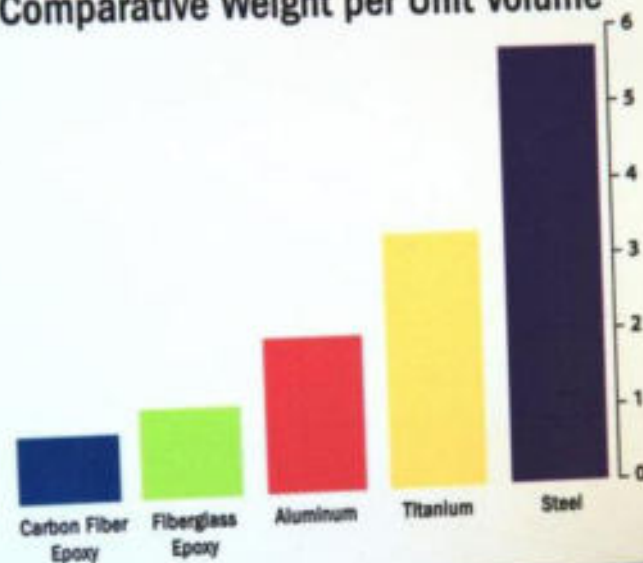


By comparison, the 777 uses 12 percent composites and 50 percent aluminum.

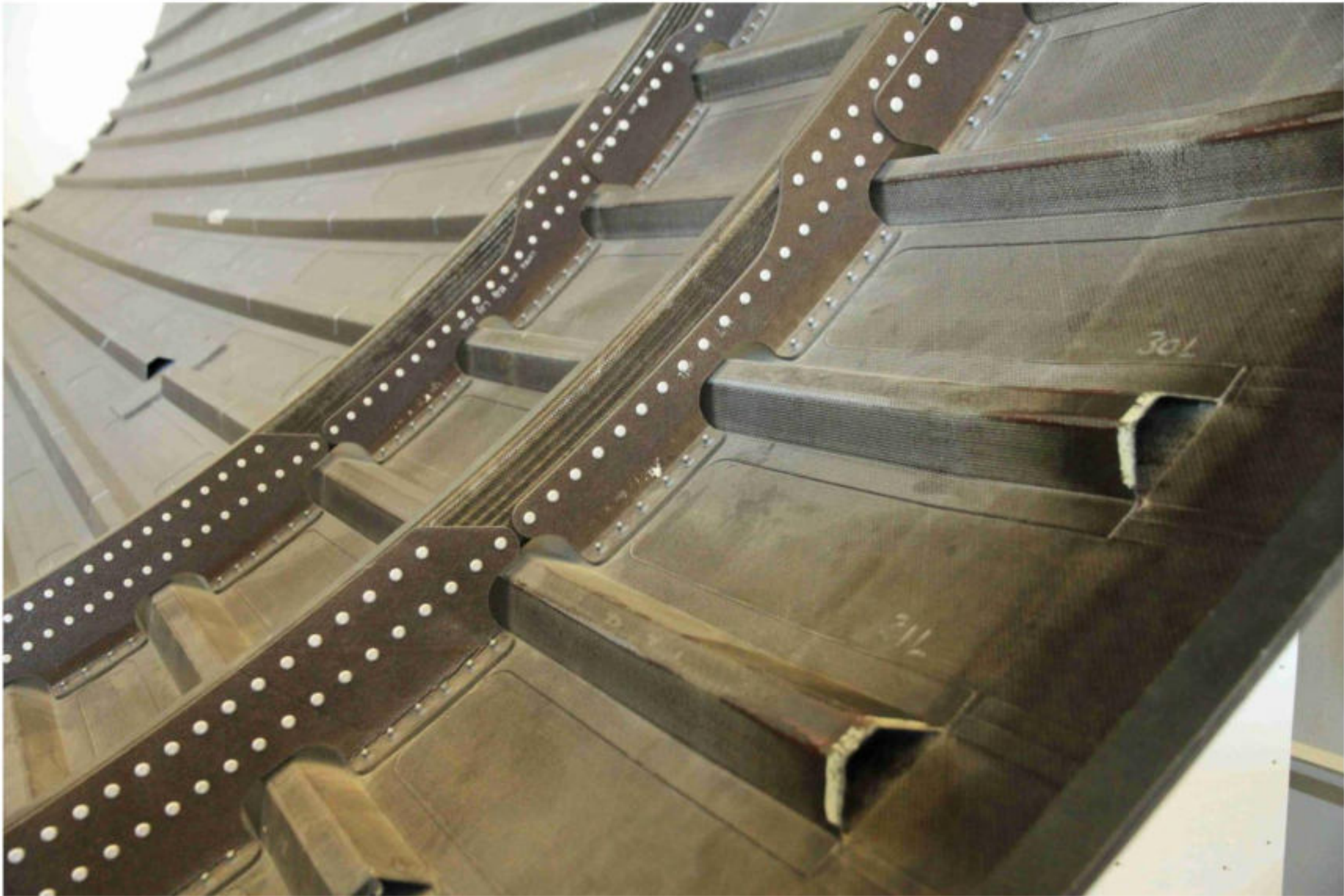
Comparative Specific Strength



Comparative Weight per Unit Volume







Kompozity

Lamináty s organickou matricí (epoxid)

výztuž –
uhlíková,
čedičová,
skleněná
tkanina

+ **výborné mechanické vlastnosti**

- vysoká cena (ca 200-700 Kč/kg)
- **nízká tepelná odolnost** (do 80-200°C)
- **jedovaté zplodiny při požáru**



Vlastnosti epoxidové matrice a vláken

	Modul pružnosti	Pevnost (tlak)	Pevnost (ohyb)	Objemová hmotnost	Teplotní odolnost
	GPa	MPa	MPa	kg.m ⁻³	°C
Epoxy	2,1 – 6	100*	100*	1,1 – 1,4	80 - 180

* Pro epoxydovou pryskyřici Epikote™ Resin MGS LR235 + tvrdidlo LH235

	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost (tah) [GPa]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Průměr vláken [μm]
Sklo	70 - 85	3,5	2,5	12 - 20
Uhlík	250 - 300	2,5 – 3,5	1,6	7 - 10
Basalt	85 - 87	2,8 - 3,1	2,67	10 - 20
Aramid -Kevlar	130	2,8	1,44	12
Ocel	210	0,34-2,5	7,8	13
SiC	250	2,2	2,6	11 - 14

Vlastnosti laminátů x dural*

POROVNÁNÍ DURAL* GP KOMPOZIT	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Pevnost v tahu 22°C [MPa]	Pevnost v tahu 700°C [MPa]
Kompozit s epoxidovou matricí a C výztuží	1700	540	0
Běžný dural	2800	350 (Rp 240)	0
GP kompozit s C výztuží	1600	320 - 340	140

bude
😊

tj. cca o 43 % méně

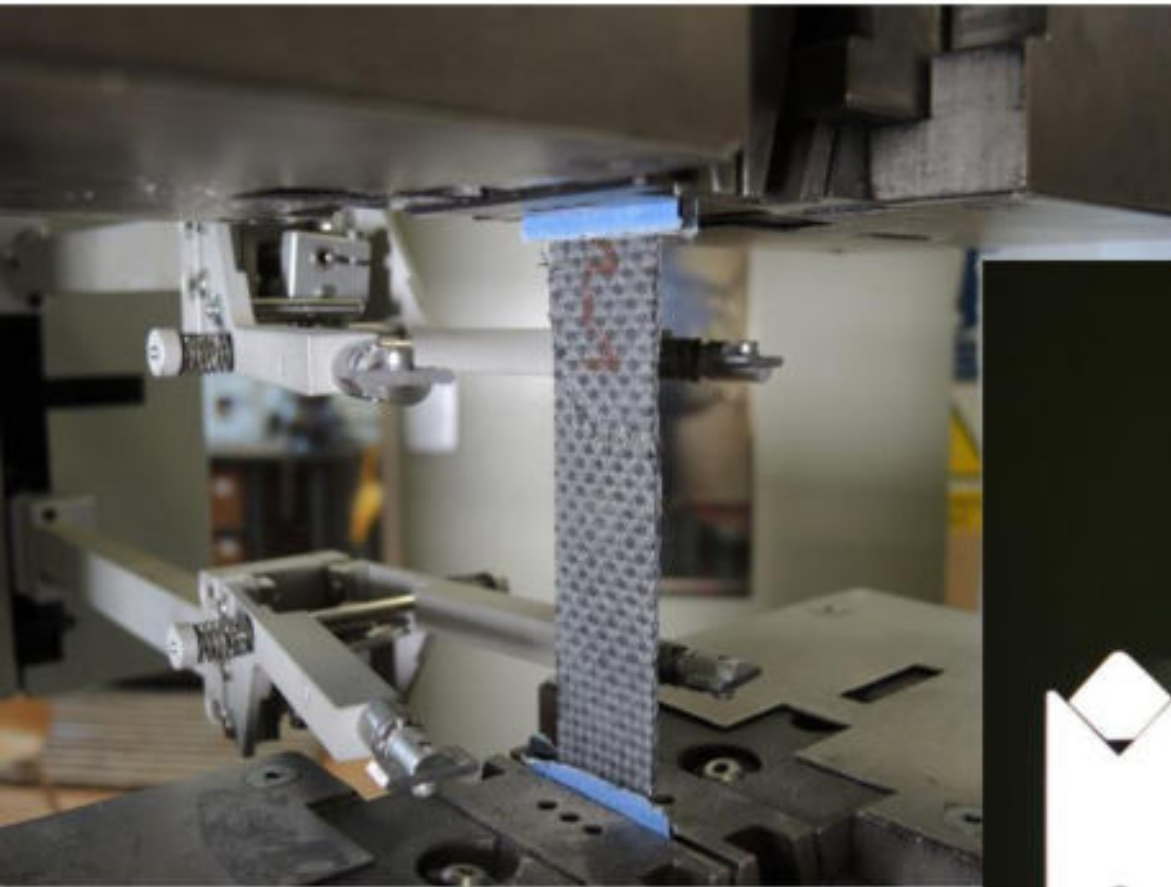
Po 700°C/1h cca 40% pevnosti
běžného duralu za běžné teploty

*Dural AlCu4Mg EN AW 2017 (ČSN 42420)

Mechanické vlastnosti laminátů - měření

Pevnost v tahu (ČSN EN 1007-7)

ZWICK/Roell Z050



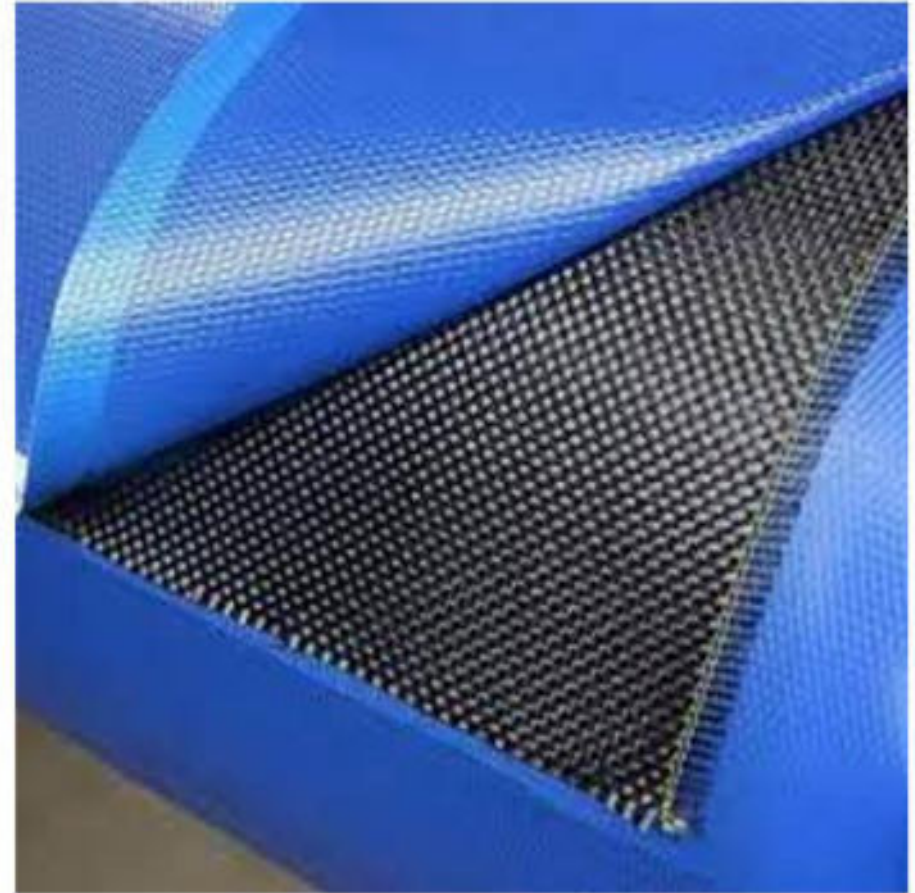
Pevnost v ohybu (ČSN EN 2562)

LabTest 6.200



Prepregy

- ✓ = polotovary k výrobě vláknových kompozitů
- ✓ = výztuž předimpregnovaná částečně vytvrzenými pryskyřicemi.
- ✓ Prepregové listy se vrství do požadované tloušťky, dotvarují ve formách a dotvrdí se působením tepla a tlaku.



Výhody použití prepregů

- ✓ snadná výroba součástí
- ✓ úspora hmotnosti - optimální poměr hmotnost/výkon
- ✓ mechanických parametry – zajištění stejných vlastností

Epoxy - za pokojové teploty - dny až týdny, při -18°C - 6 až 12 měsíců

Děkuji vám za pozornost