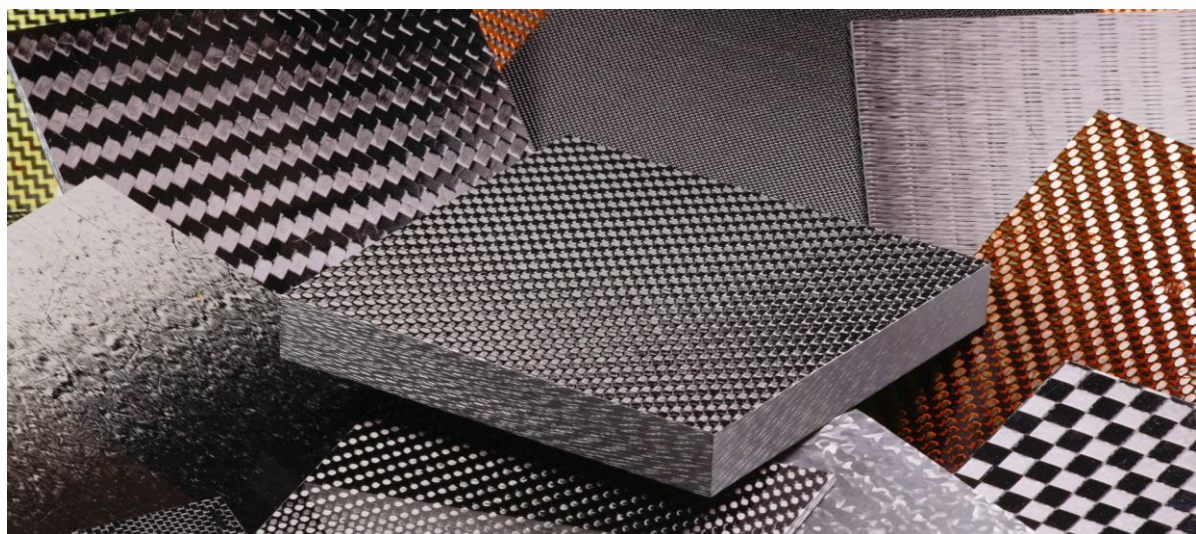


10

Polymerní kompozitní materiály

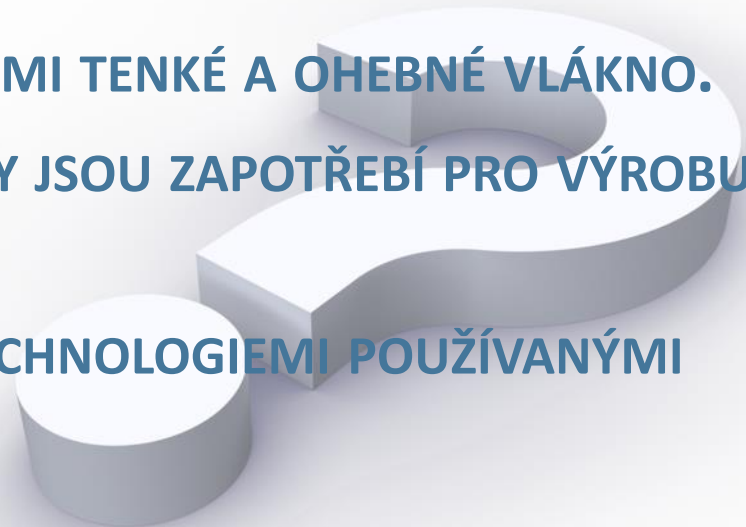


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání


MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- VYJASNÍME SI, CO JSOU TO KOMPOZITNÍ MATERIÁLY A PROČ SE POUŽÍVAJÍ.
- ZJISTÍTE, ŽE NEJENOM ROZVOD ELEKTRICKÉ ENERGIE MŮŽE BÝT „VÍCEFÁZOVÝ“.
- VYSVĚTLÍME SI ROZDÍL MEZI MATRICÍ, VYZTUŽUJÍCÍ FÁZÍ A ROZHRANÍM V KOMPOZITECH.
- NA PRAKTICKÝCH PŘÍKLADECH SI UKÁŽEME, KDE ČERPAL ČLOVĚK INSPIRACI PŘI VÝVOJI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ.
- DETAILNĚJI SE BUDEME ZABÝVAT POLYMERNÍMI KOMPOZITNÍMI MATERIÁLY.
- UKÁŽEME SI, JAK LZE ZE SKLA VYROBIT VELMI TENKÉ A OHEBNÉ VLÁKNO.
- TAKÉ SI UKÁŽEME, JAKÉ EXTRÉMNÍ TEPLoty JSOU ZAPOTŘEBÍ PRO VÝROBU UHLÍKOVÝCH VLÁKEN.
- STRUČNĚ SE SEZNÁMÍME S ROZLIČNÝMI TECHNOLOGIEMI POUŽÍVANÝMI PRO VÝROBU RŮZNÝCH TYPŮ KOMPOZITŮ.

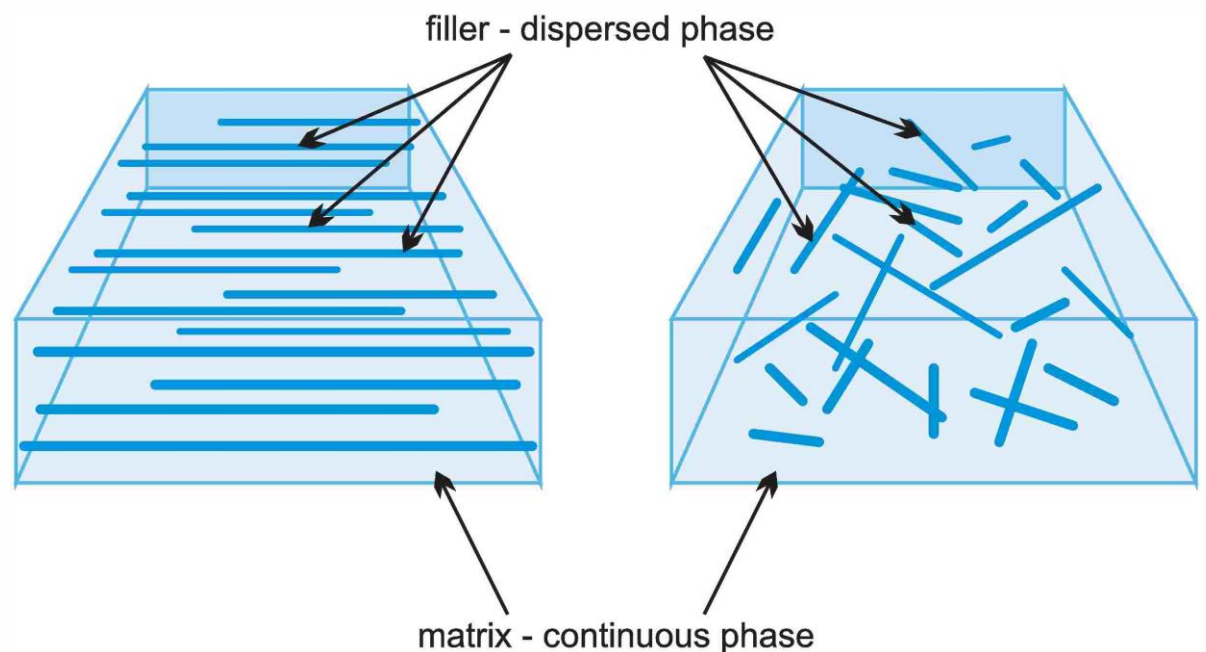


10.1 Podstata a význam kompozitních materiálů

10.1.1 Co jsou to kompozitní materiály

Kompozitní materiály (kompozity) jsou **heterogenní látky** tvořené **dvěma**, popř. **více fázemi**, obvykle **rozdílného chemického složení**, které se liší také svými **fyzikálními** a **mechanickými vlastnostmi**.

Jedna z fází tvoří **matrici kompozitu** a je **spojitou fází**. Druhá fáze **zpevňující matrici** kompozitu je obvykle **nespojita** a jedná se o tzv. **výztuž** tvořenou částicemi různého typu a tvaru.



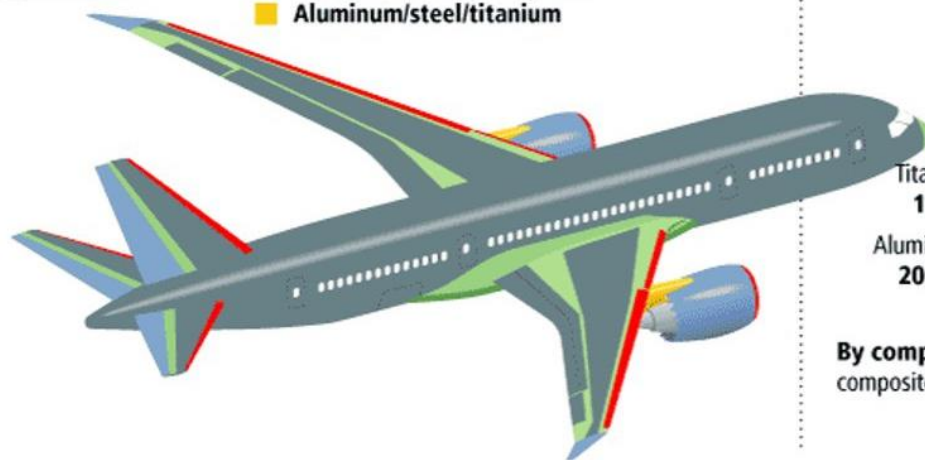
Významnou vlastností kompozitních (složených) materiálů je především jejich **vysoká měrná pevnost**. Kompozity různého druhu se uplatňují v *leteckých konstrukcích*, v *raketové technice*, v *dopravě*, v *chemickém průmyslu*, ve výrobě *sportovních potřeb*, v *elektrotechnice* apod.



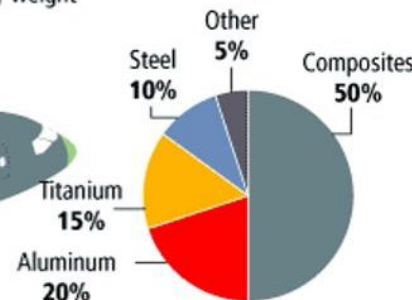
Využití kompozitů v letadle Boeing 787 Dreamliner

Materials used in 787 body

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



Total materials used
By weight



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

10.1.2 Matrice kompozitu

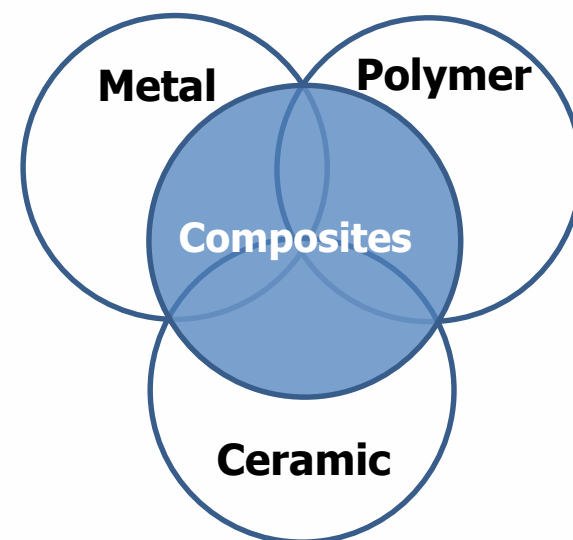
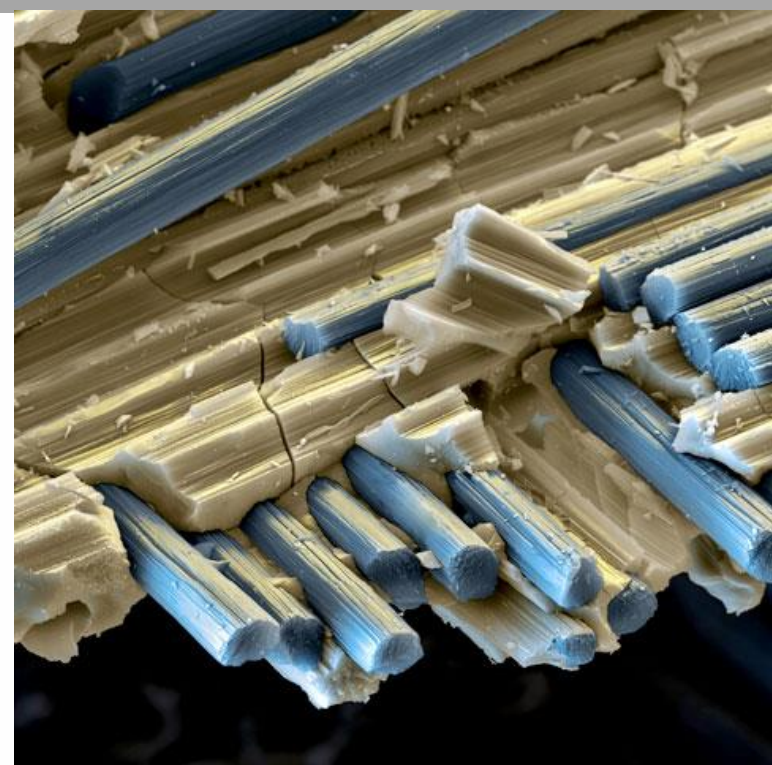
Matrice kompozitu má **nižší pevnostní vlastnosti** a **větší plasticitu** a často také **nízkou hustotu**.

Základními funkcemi matrice jsou:

- **přenos vnějšího zatížení na zpevňující fázi,**
- *(na makroskopické úrovni)* **vzájemně provázat zpevňující fázi a chránit ji před mechanickým, popř. chemickým poškozením,**
- *(na mikroskopické úrovni)* **oddělovat jednotlivé částice zpevňující fáze a bránit tak rozvoji křehkého porušení kompozitu.**

Matrice kompozitu může být:

- ***kovová,***
- ***polymerní,***
- ***keramická,***
- ***nebo tvořená jejich vzájemnou kombinací.***



10.1.3 Zpevňující fáze (výztuž)

Zpevňující fáze má **vysokou pevnost**, **vysoký modul pružnosti** (výrazně vyšší než modul pružnosti matrice) a **malou deformaci do lomu** (1 až 2 %).

Zpevňující fáze **přenáší převážnou část vnějšího zatížení** a může být (i) **kovová**, (ii) **skleněná** nebo (iii) **keramická**, popř. mohou být kompozity zpevněné (iv) **vláknovými monokrystaly (whiskery)**.

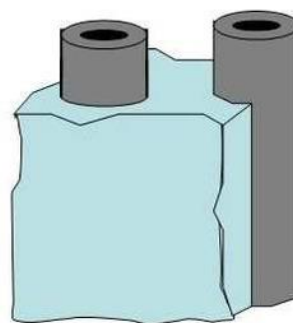
Podle tvaru zpevňující fáze rozlišujeme kompozity s:

- 1) **částicovou zpevňující fází (částicové kompozity)** mají kulovitý, deskovitý nebo tyčkovitý tvar výztuže;
- 2) **vláknovou zpevňující fází (vláknové kompozity)** s průběžnými nebo krátkými vlákny.

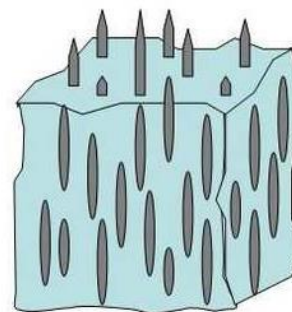


Různé druhy výztuží:

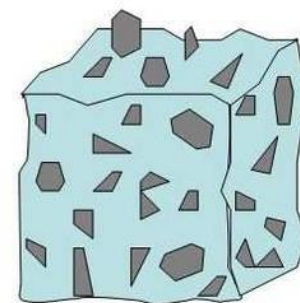
- a) **průběžná (spojitá) dlouhá vlákna**,
- b) **krátká (nespojité) vlákna** nebo **whiskery**,
- c) výztuž ve formě **částic**.



a)



b)

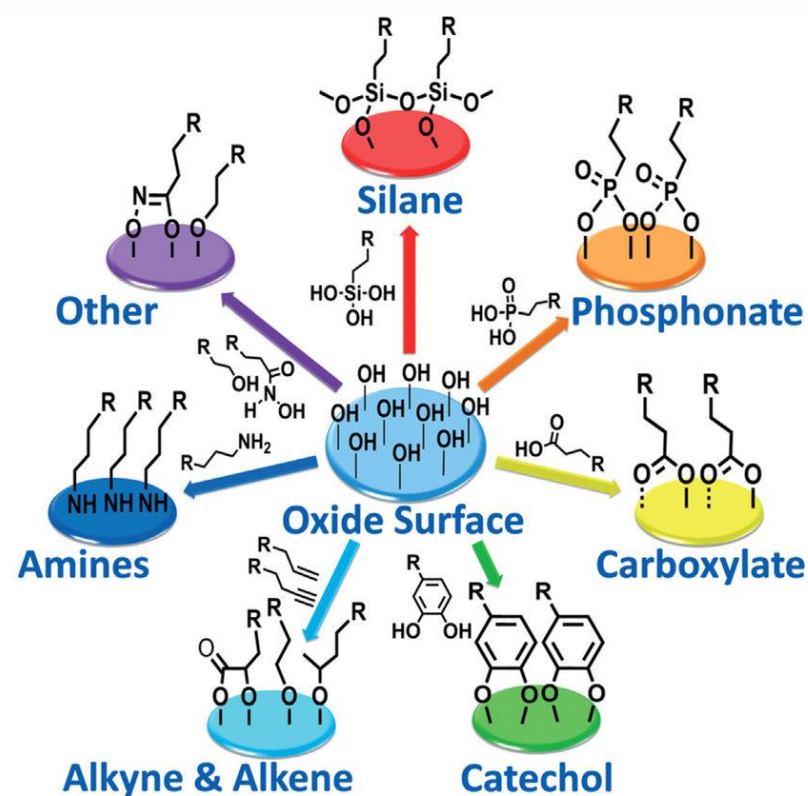


c)

10.1.4 Rozhraní

Rozhraní tvoří přechodovou **vrstvu mezi matricí a zpevňující fází**. Rozhraní **zajišťuje potřebné vlastnosti kompozitu** a jeho existence je **podmínkou pro dobrou soudržnost obou fází**.

Pro určitý typ zpevňující fáze je proto nutné použít jen určité druhy matrice, popř. vytvořit vhodnou **přechodovou (vazební) vrstvu** na povrchu zpevňující fáze.

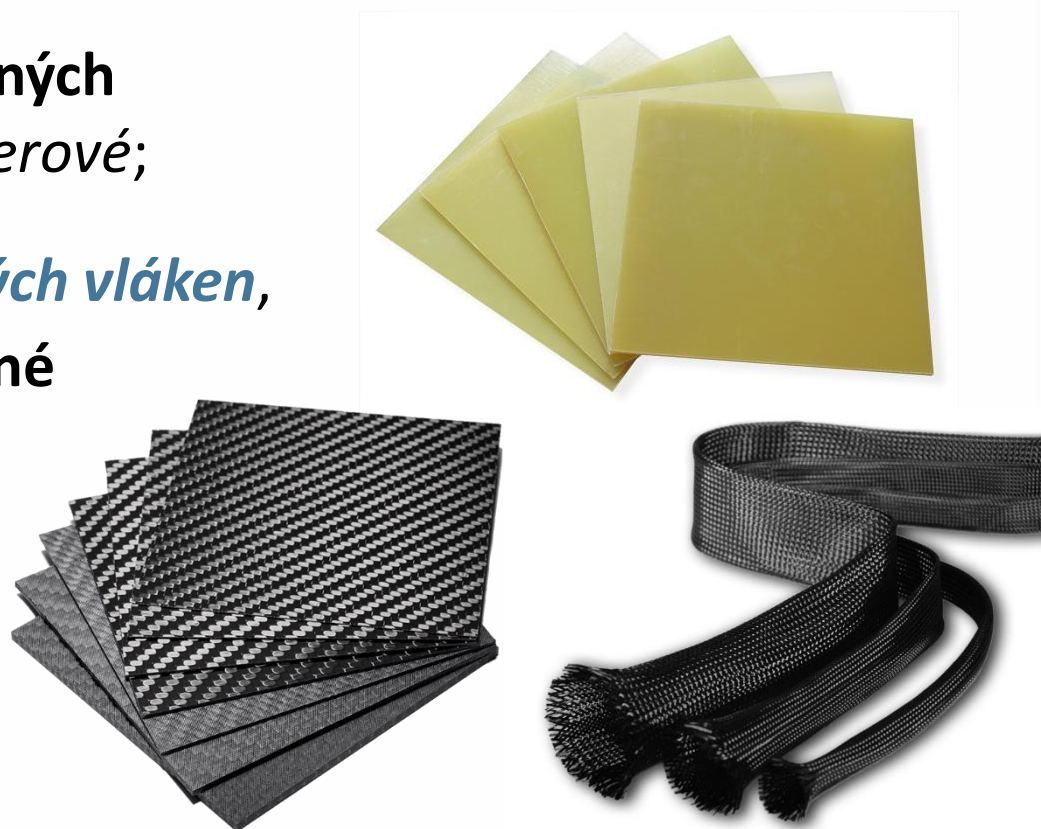


10.1.5 Význam kompozitních materiálů

Význam kompozitních materiálů celosvětově roste. Jsou vyhledávány zejména díky jejich **nízké měrné hmotnosti** a **vysoké měrné pevnosti**. Oproti tradičním ocelovým součástem mají i **při větším objemu** podstatně **nižší hmotnost**, což usnadňuje jejich přepravu, rychlou a snadnou montáž a demontáž.

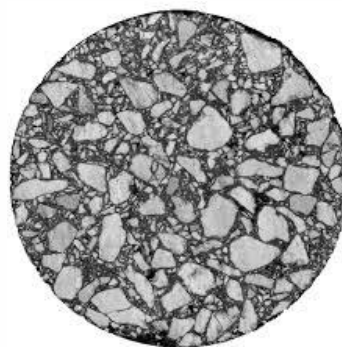
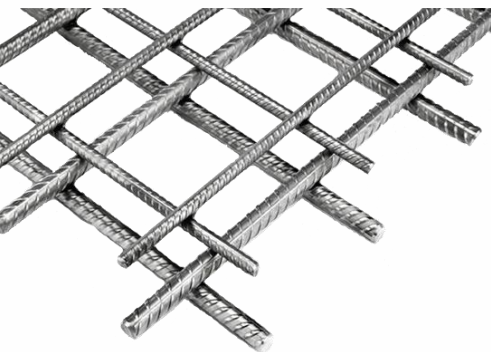
Mezi hojně používané zástupce kompozitních materiálů patří např.:

- **skelný laminát** – kompozit ze **skleněných vláken** a **pryskyřice**, obvykle *polyesterové*;
- **kompozity z uhlíkových a aramidových vláken**, ze kterých se vyrábějí **extrémně pevné a lehké díly** pro konstrukce *letadel a raket*, užití mají i v *automobilovém průmyslu* a v *ozbrojených složkách* (neprůstřelné vesty);



10.1 Podstata a význam kompozitních materiálů

- **železobeton** – kompozit z **ocelových drátů** a **betonu** (*beton* je také kompozit, z *kameniva* a *cementu*);
- **asfaltová směs** na výrobu **povrchu komunikací**.



10.1.6 Výhody kompozitních materiálů

- Kompozitní materiály se výrazněji **nedeformují** (mají **velkou pružnost při deformaci**).
- Mají **velmi vysokou mez únavy**, jsou **stabilní a spolehlivé**.
- Mají **vysokou pevnost a tuhost**, kterou lze přizpůsobit směru a druhu zatížení (zejména při zatížení v tahu ve směru vláken, při nízké hmotnosti kompozitu).
- Mají **vysokou odolnost proti korozi** i v **agresivním prostředí**, včetně UV záření a **výborné tepelně izolační vlastnosti**.
- Mají **nízký součinitel délkové teplotní roztažnosti**.
- **Velká variabilita materiálů matrice a výztuže** umožňuje navrhnout materiály tzv. „na míru“.
- **Dobrá surovinová základna** a menší požadavek na investice při malém počtu výrobků.



10.1.7 Nevýhody kompozitních materiálů

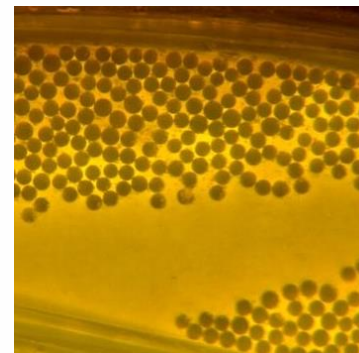
- U vláknových kompozitů je **nízká mez pevnosti v tahu ve směru kolmém ke směru uložení vláken = tvorba trhlin.**
- Kompozity stárnou v závislosti na vlhkosti a teplotě. Nežádoucí může být jejich **nasákavost.**
- **Obtížné nedestruktivní zkoušení materiálu.** Místní poškození, např. nárazem, se **obtížně poznávají a hůře opravují** než např. u *hliníkových konstrukcí*.
- Kompozitní materiály s *epoxidovou matricí* **mohou být citlivé na ředidla**; nicméně, jiné běžné chemikálie užívané ve strojích jako *vazelína, oleje, rozpouštědla, barvy* či *ropa* kompozity nepoškozují.
- Může nastat „neobvyklé“ chování materiálu – **vlastnosti kompozitu nelze jednoduše odvodit součtem vlastností jeho složek.**



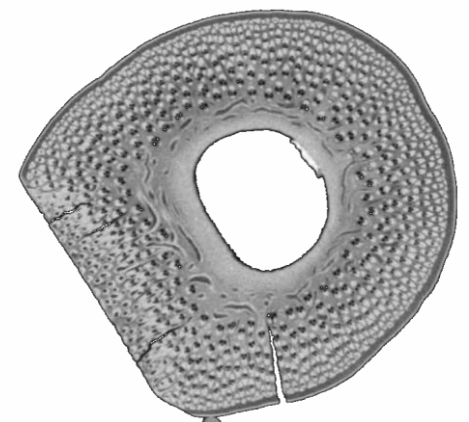
10.1.8 Inspirace přírodou

Je běžné, že příroda využívá **synergických účinků různorodých materiálů** pro dosažení **lepších vlastností** a vytváří materiály připomínající materiály kompozitní. Čisté, bezdefektní a homogenní materiály se v přírodě **vyskytují velice zřídka**.

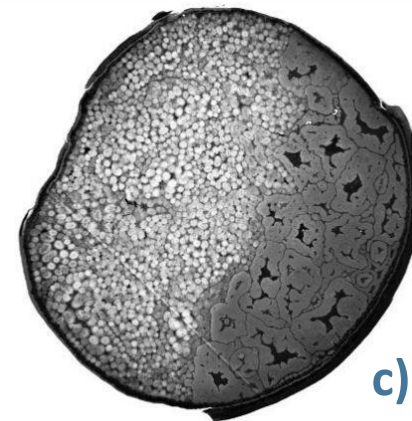
Dobrým příkladem může být řez buňkou **vlny merino** nebo **bambusovým vláknem**, které jsou velmi podobné příčnému řezu epoxidové pryskyřice jednosměrně vyztužené vlákny. Mezi další příklady patří také **dřevo** (*lignin* vyztužený vlákny *celulózy*) a **kosti** (*hydroxyapatit* vyztužený *kolagenovými vlákny*).



a) Epoxid + sklo



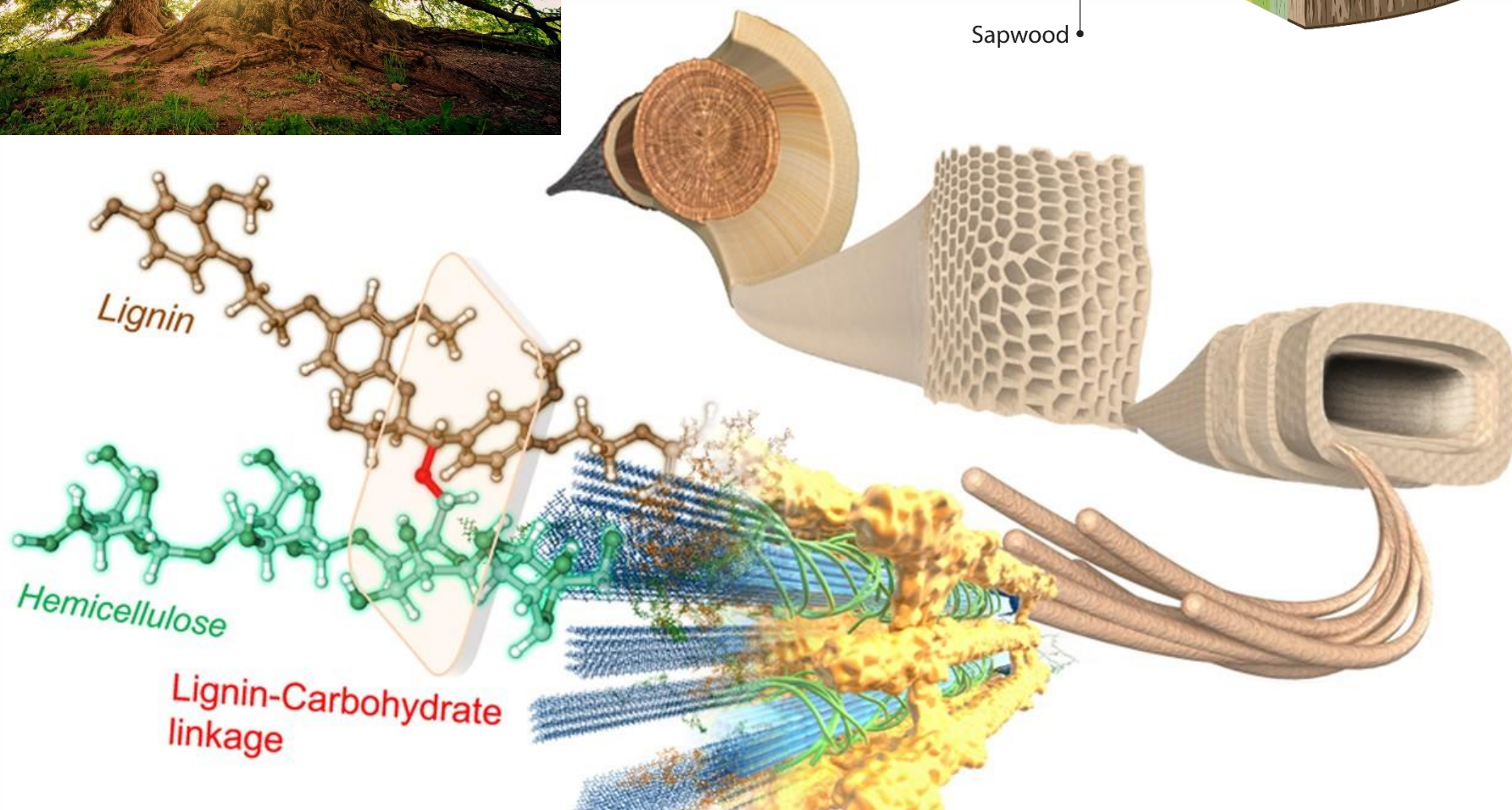
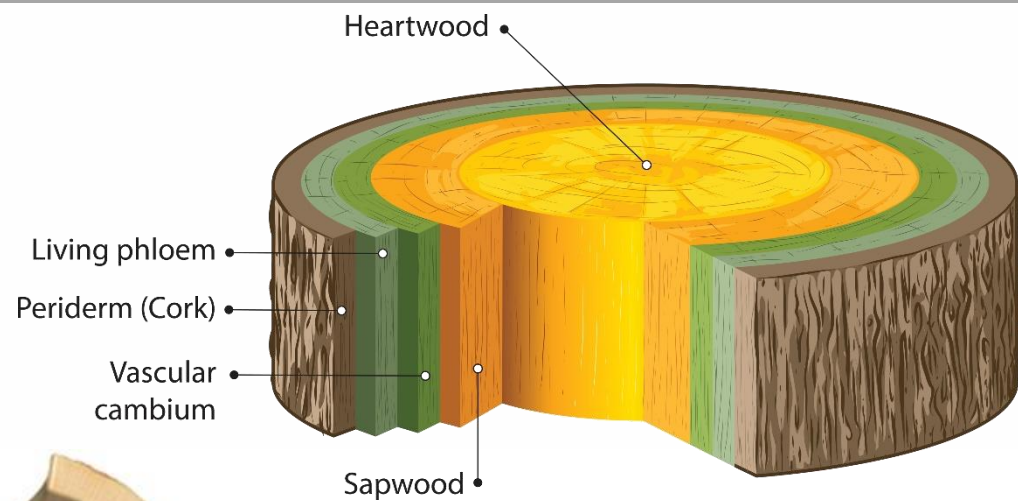
b) Bambus



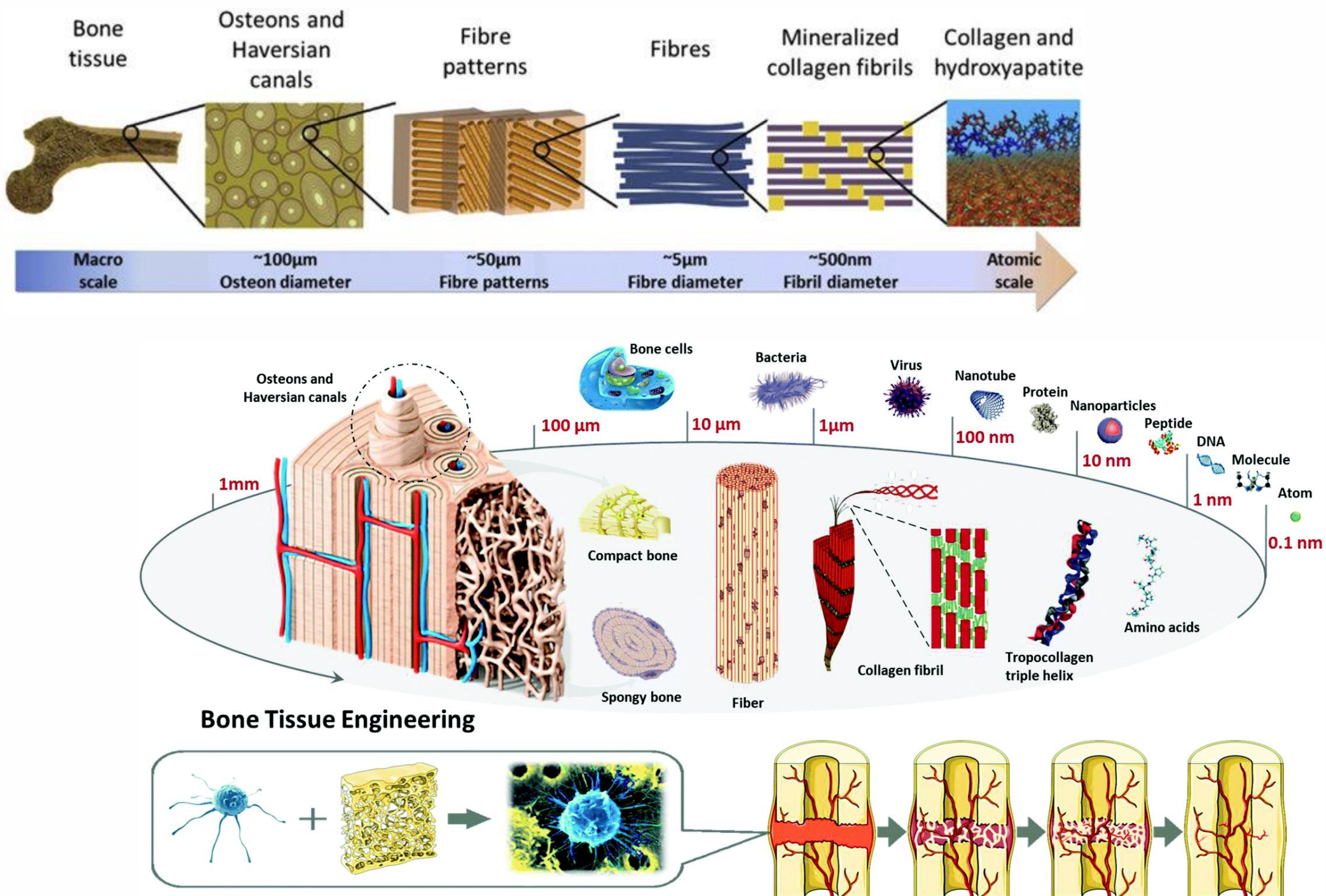
c) Vlákno vlny

Poznámka: **Lignin** je organická vysokomolekulární amorfnní látka spojující mezibuněčná vlákna dřeva. **Hydroxyapatit** je hlavní neorganickou složkou *kostí* a *zubů*. Jde o přirozenou formu *vápníku* a *fosforu*. Jedná se o *biokeramický materiál*.

10.1 Podstata a význam kompozitních materiálů

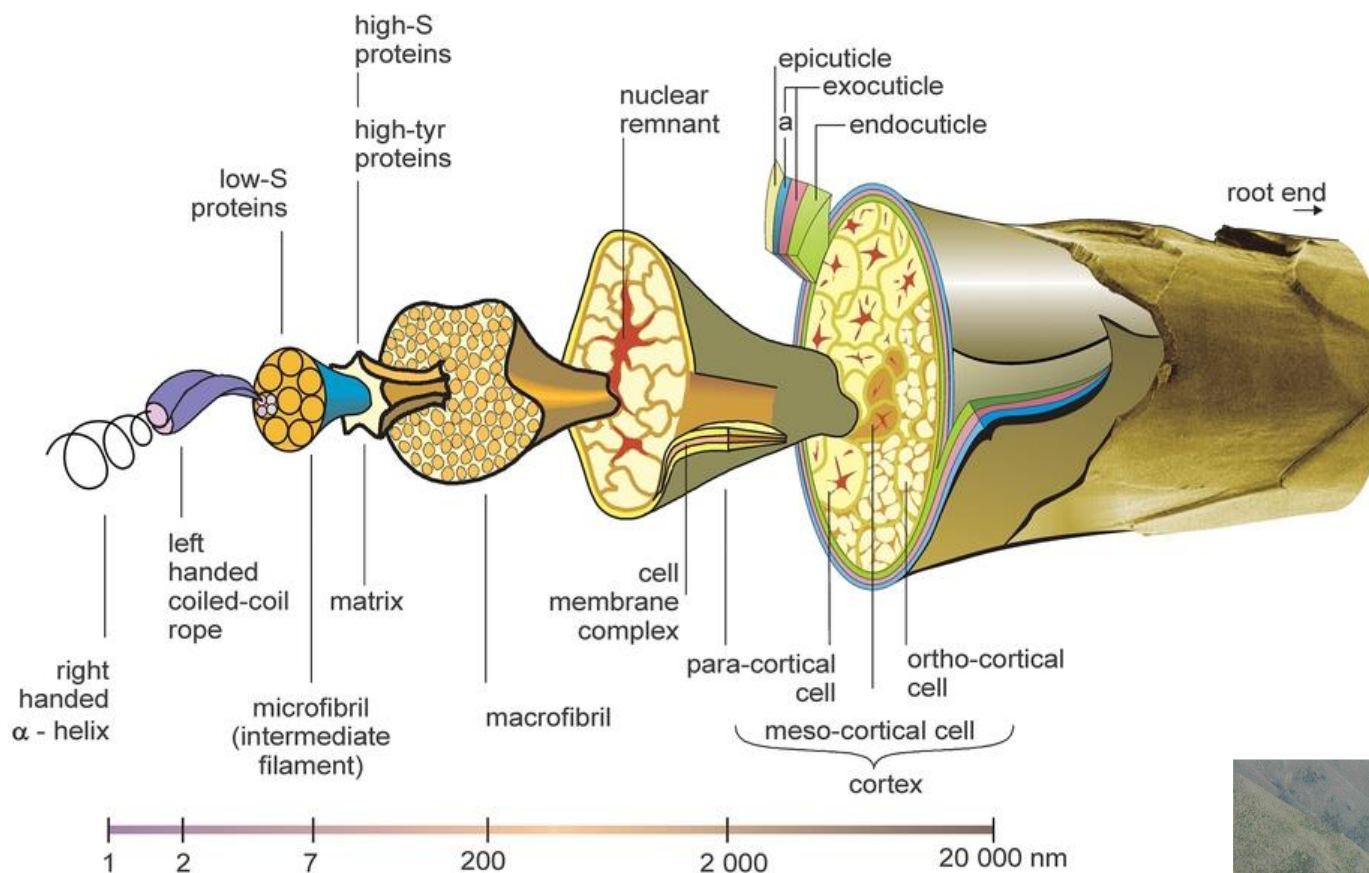


10.1 Podstata a význam kompozitních materiálů



10.1 Podstata a význam kompozitních materiálů

THE STRUCTURE OF A MERINO WOOL FIBRE



10.1 Podstata a význam kompozitních materiálů

Člověk nevědomky a zcela přirozeně vyráběl kompozitní materiály **již velmi dávno**.

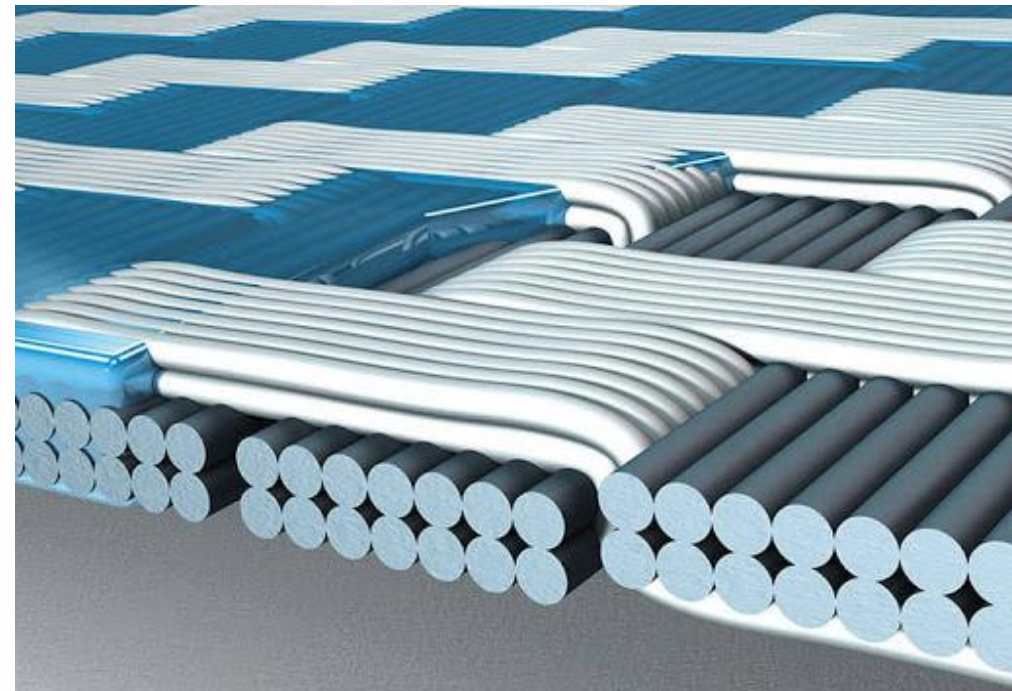
Ve starém zákoně je popsána výroba **sušených cihel**, které byly vyráběny z **jílu** promíseného se **sušenou slámou**. Vlákna slámy zabraňovala **křehkému lomu cihel** a **odváděla vlhkost zevnitř**.



10.2 Klasifikace kompozitních materiálů

Podle současného chápání pojmu kompozit musí být k zařazení **vícefázového materiálu** mezi **kompozitní materiály** splněny následující podmínky:

- 1) podíl výztuže musí být větší než 5 %,
- 2) **vlastnosti výztuže a matrice** (*mechanické, fyzikální i chemické*) **se liší** (výztuž je významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice),
- 3) kompozit musí být připraven **smícháním složek**,
- 4) existence **synergického účinku** spojením jednotlivých složek kompozitu,
=> výsledné vlastnosti kompozitů **nejsou prostým součtem vlastností** složek kompozitu, nýbrž jejich **spolupůsobením – synergií**.



Kromě již uvedeného dělení dle **materiálu matrice** (kovové, polymerní a keramické kompozity) a **výztuže** (částicové, vláknové), můžeme kompozitní materiály také klasifikovat, např.:

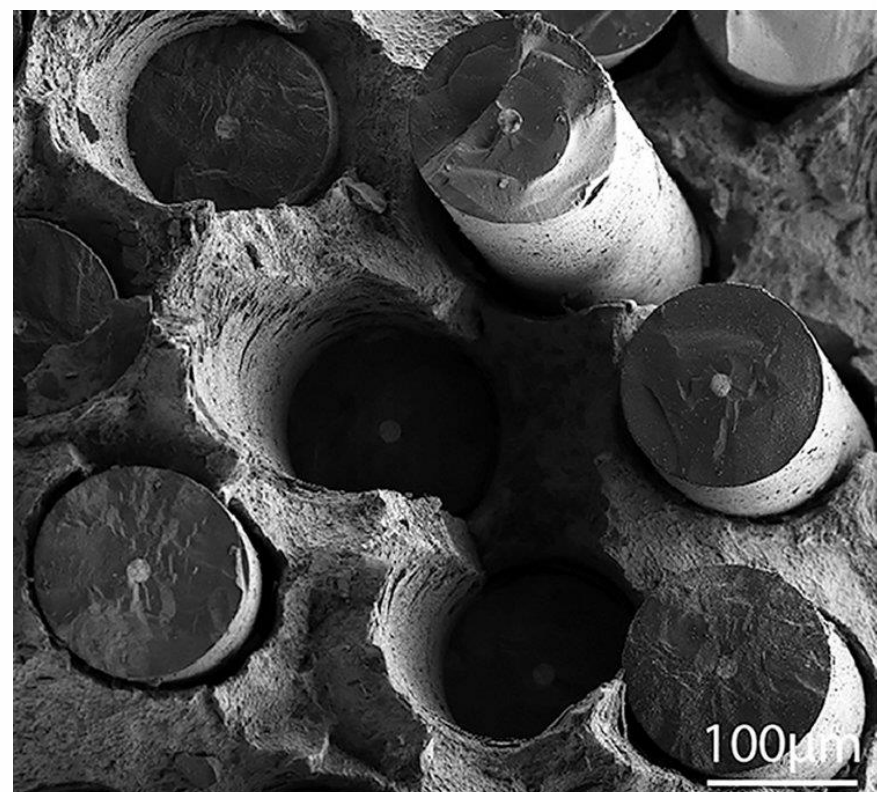
1) Podle technologického (výrobního) hlediska na kompozity připravené:

- lisování za tepla v tuhém stavu,
- v tekutém stavu (*infiltrace, lití*),
- nanášením matrice na povrch vláken,
- jinými způsoby.

2) Podle použité materiálové kombinace na:

- kompozity **kov-kov**,
- kompozity **kov-keramika**,
- kompozity **keramika-keramika**,
- kompozity **polymer-sklo** atd.

Vysokopevnostní kompozit s kovovou maticí na bázi titanu a karbidu křemíku



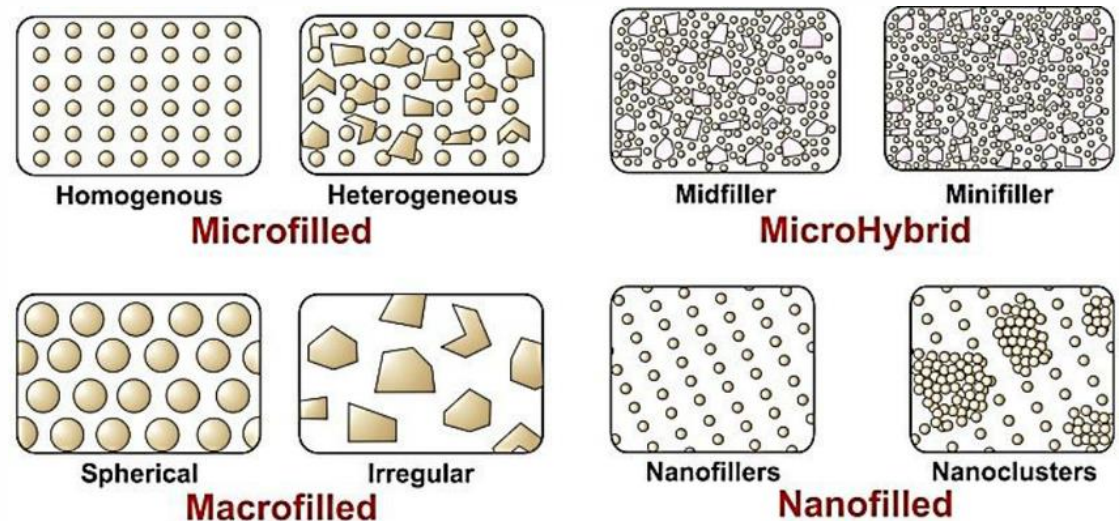
10.3 Kompozity s polymerními matricemi

Kompozitům s polymerní matricí je věnována zdaleka největší pozornost, protože vykazují (i) **výborné mechanické vlastnosti**, (ii) **odolnost proti korozi**, (ii) jsou **zpracovatelné a tvarovatelné jednoduchými technologiemi** a (iv) jejich výroba **není závislá na důležitých (strategických) surovinách**.

10.3.1 Částicové kompozity

Využívají **ztužujícího účinku plniva**. Nejběžnějšími **plnivy** jsou: *mikromletý vápenec, skleněné kuličky, kovy v čisté formě nebo jejich oxidy, mastek, kaolín a slída*. **Matrici** může tvořit celé spektrum polymerů (velmi často např. *epoxidová pryskyřice*).

Začleněním plniva **dosahujeme**: *zvýšení tvarové stálosti, funkční teploty, modulu pružnosti, odolnosti proti tečení, zlepšení zpracovatelnosti a povrchových vlastností* nebo např. *snížení hořlavosti*.



Negativním účinkem začlenění plniv může být **snížení pevnosti a houževnatosti** (ne vždy) a **zvětšení hustoty** matrice. Nejvhodnější velikost částic je asi do **10 mikrometrů**, větší částice mohou působit jako **strukturní defekty**. Kvalitu kompozitu významně ovlivňuje **vzájemná povrchová přilnavost** mezi materiálem *matrice* a *plnivem*.

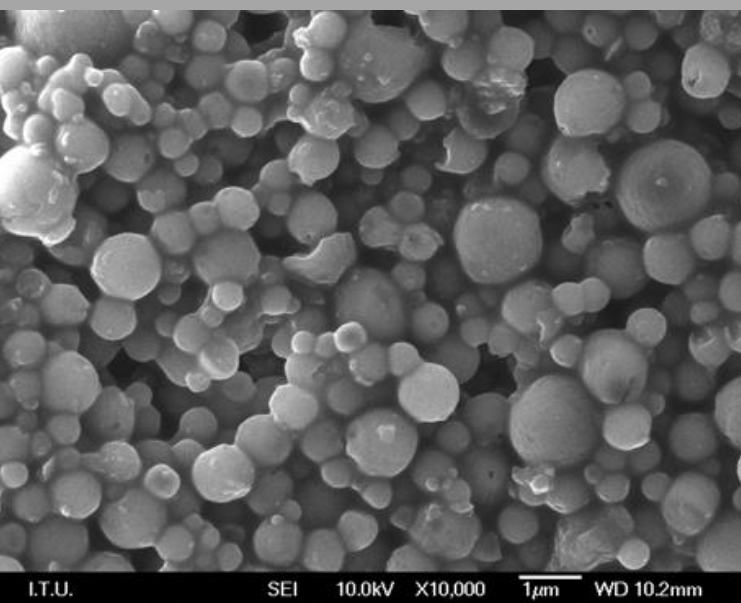
V souvislosti s částicovými kompozity je právě **rozměr částic** velmi diskutovaným tématem, poněvadž výrazně ovlivňuje výsledné vlastnosti kompozitu – v tomto ohledu rozlišujeme **mikrokompozity** a **nanokompozity**.

a) Mikrokompozitní materiály (velikost částice nebo průměr vlákna v řádu μm) – oproti kovům a jejich slitinám mají menší hustotu a tedy příznivý poměr pevnosti v tahu a modulu pružnosti k hustotě => **dosahují velké měrné pevnosti**.

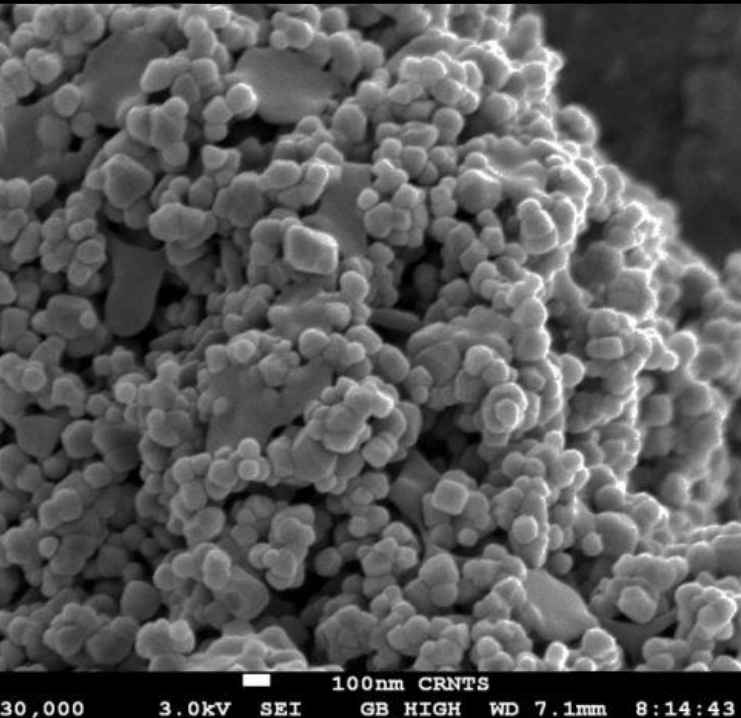
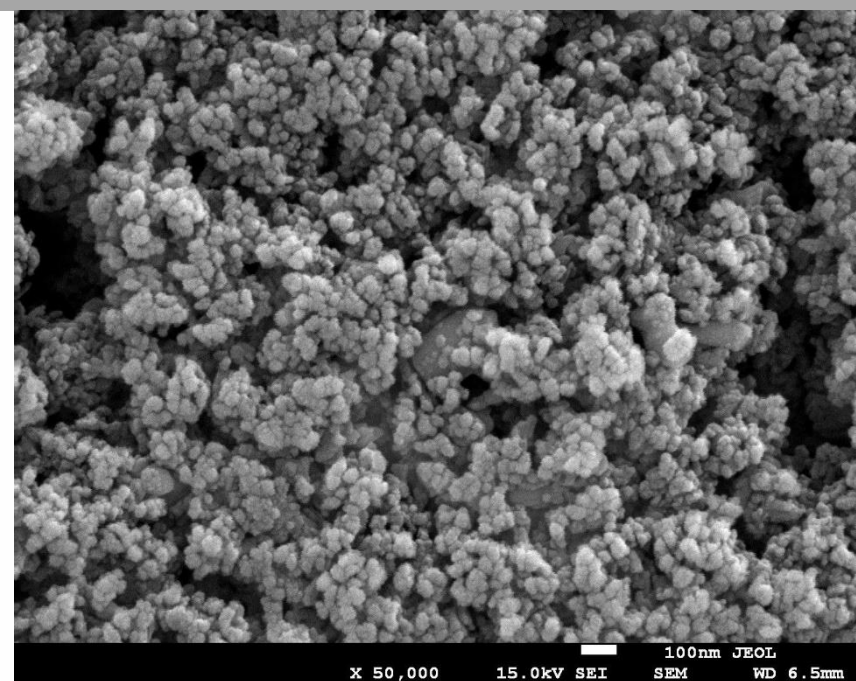
b) Nanokompozity by měly mít velikost částice (nebo průměr vlákna) ideálně **v jednotkách nm**; nicméně, obecně je jako kritérium pro začlenění materiálu mezi nanokompozity vyžadován tento rozměr **menší než 100 nm**. Jedná se o perspektivní skupinu materiálů



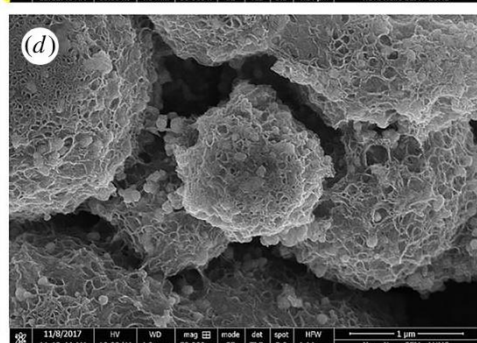
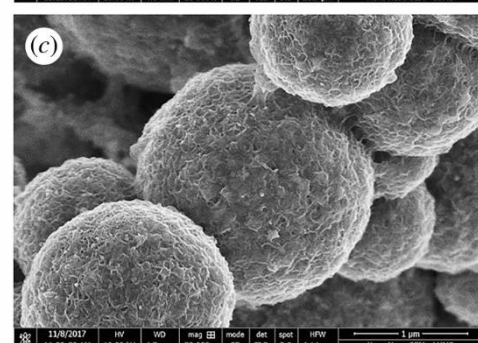
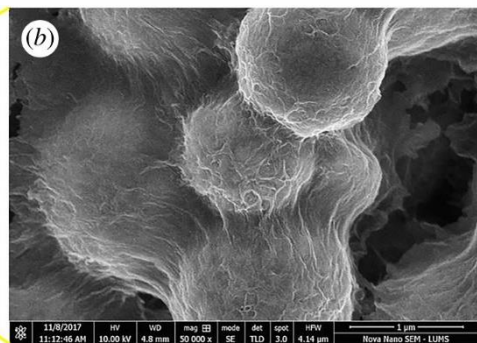
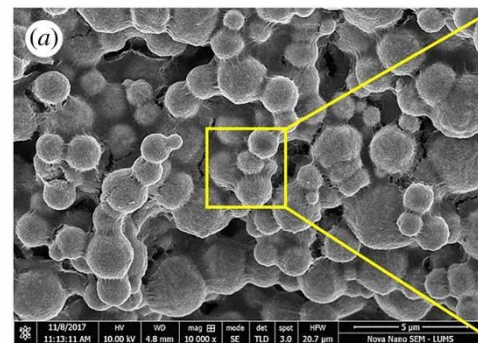
10.3 Kompozity s polymerními matricemi



← Nanočástice Al_2O_3 →
(*alumina, oxid hlinitý*)
vylepšení vlastností
elektroizolačních
materiálů.



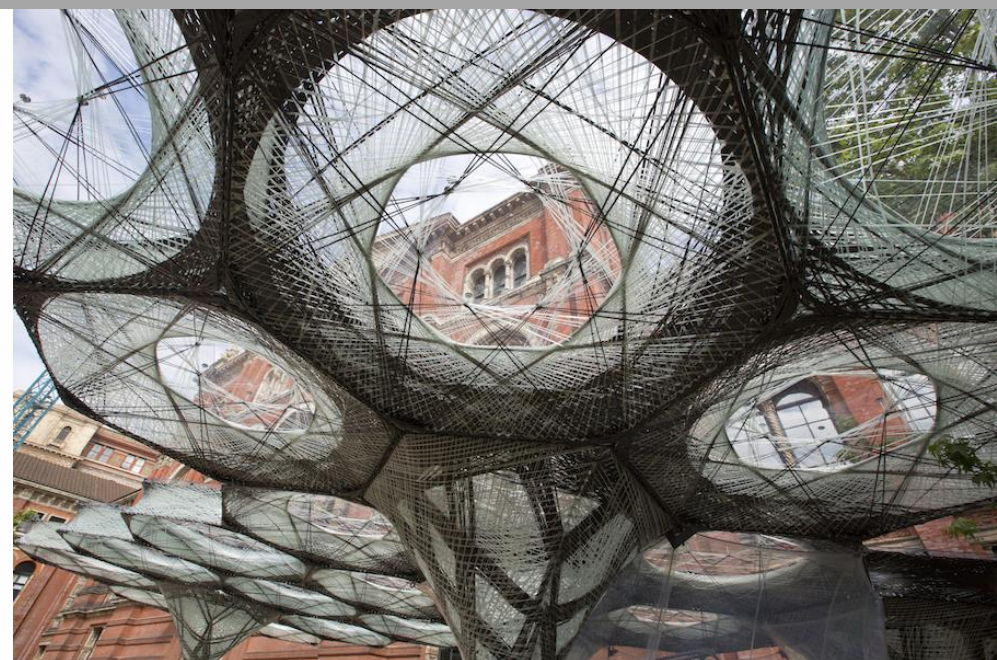
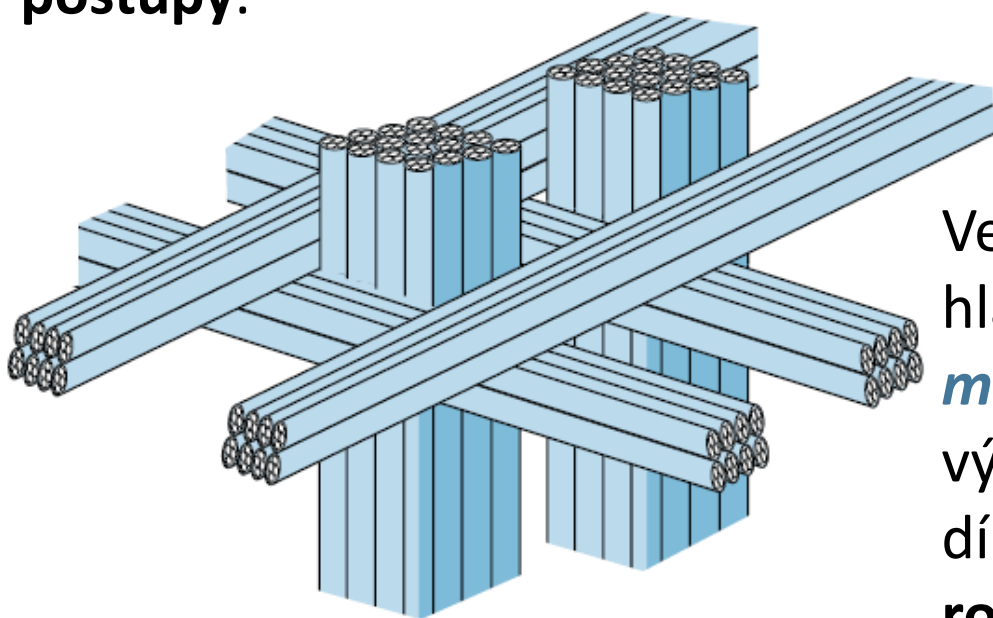
← Nanočástice TiO_2
(*titanová běloba, oxid
titaničitý*)
vylepšení vlastností
elektroizolačních
materiálů.



Nanočástice kobaltu potažené stříbrem →
(mají mg. chování a jsou perspektivní pro transport léčiv).

10.3.2 Vlákný vyztužené kompozity

Vlákný vyztužené kompozity nabízí **velmi široké možnosti** uspokojující požadavky od **jednoduchých technických aplikací** až po **extrémní konstrukce** v letectví a kosmonautice; od **jednoduchých** způsobů ruční, kusové výroby až po **vysoce složité výrobní postupy**.



Elytra Filament Pavilion (zahrada John Madejski Museum) – přístřešky z kombinace *skleněných* a *uhlíkových* vláken vytvořené robotem.

Vedle **vyztužujících vláken**, které jsou hlavními **nositeli pevnosti**, je **polymerní matrice** přinejmenším stejným způsobem významná pro uplatnění konstrukčních dílů v technické praxi, zejména **výrazně rozhoduje o racionálním způsobu výroby**.

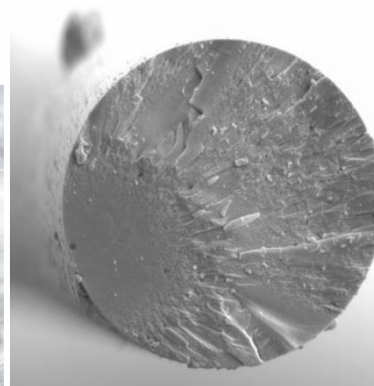
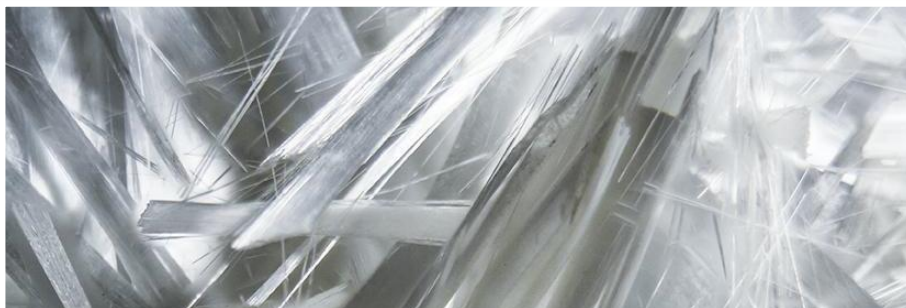
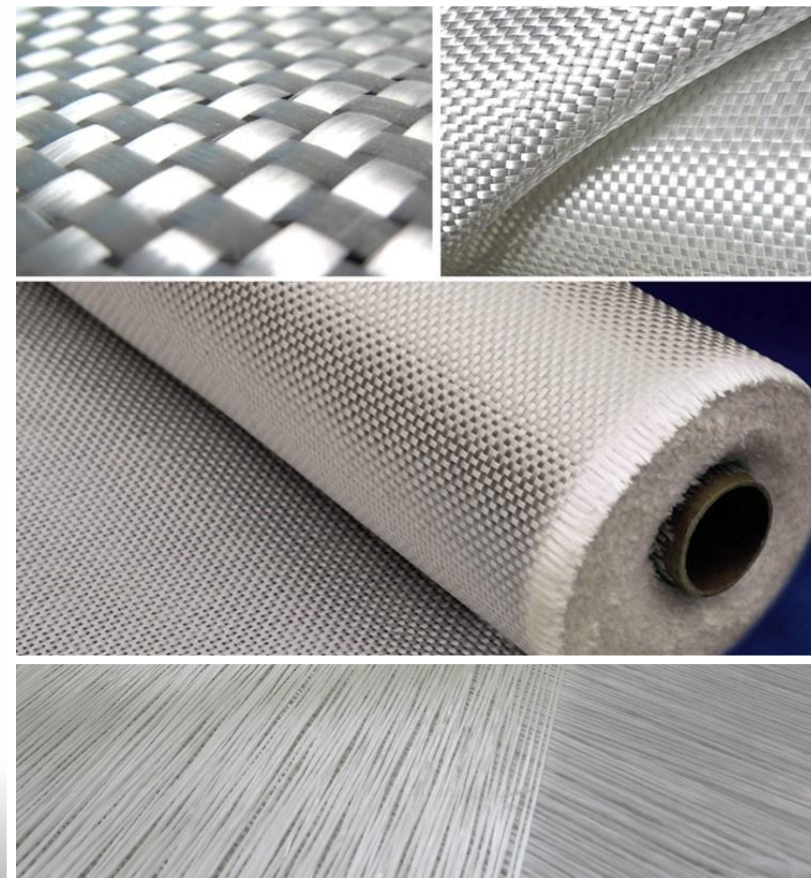
I. VYZTUŽUJÍCÍ VLÁKNA

Materiály složené pouze z vláken se cíleně jako konstrukční prvky používají zřídka. Zajímavými se stávají teprve v „**kompaktní**“ formě, jako je tomu v **kompozitních materiálech**.

Podle **použitého materiálu** rozlišujeme vyztužující vlákna: **a) skleněná**, **b) aramidová**, **c) uhlíková** a **d) přírodní**.

a) Skleněná vlákna (GF – *Glass Fiber*)

Je společný název pro **tenká vlákna** ($\varnothing$ 3,5 až 24 μm) s **pravidelným kruhovým průřezem**, tažená z **roztavené skloviny** a používaná v různých oblastech průmyslu. Podle **složení skloviny** rozlišujeme různé druhy skleněných vláken.



E-vlákna (Electrical) – z *hlinito-borosilikátového skla* s **velmi nízkým obsahem alkalických kovů** ($< 1 \%$). Jsou používána **nejčastěji** a zaujímají asi 90 % trhu. Mají **vynikající elektroizolační vlastnosti** a **vysokou prostupnost pro záření**.

R-vlákna (Resistant) – s vyšším obsahem *oxidu křemičitého* (SiO_2), *oxidu hořečnatého* (MgO) a *oxidu hlinitého* (Al_2O_3); **mají vyšší mechanickou pevnost**. V USA značeny s příznakem „S“ (*Strength*), v Japonsku jako „T“ (*Tsuyoi*).

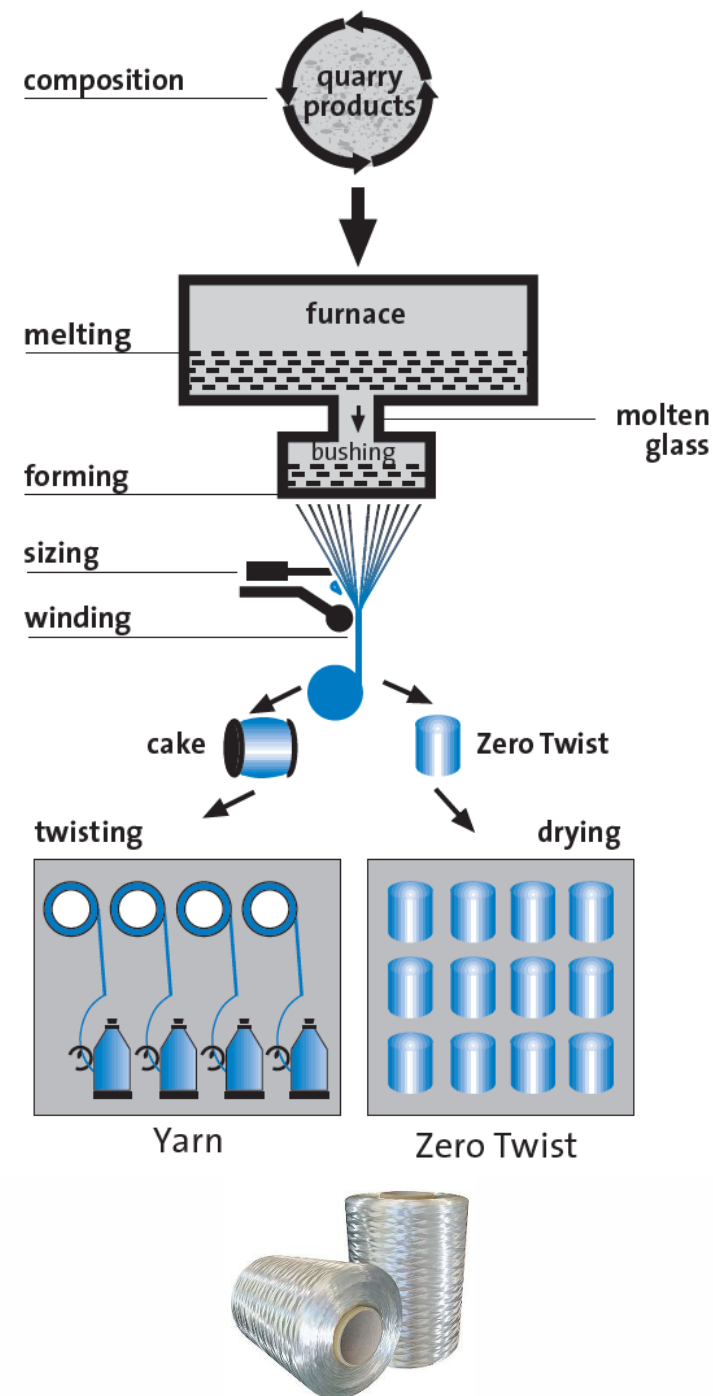
C-vlákna (Corrosion) – s **vysokým obsahem boru**. Vyznačují se **vysokou odolností proti kyselinám** a **proti chemicky agresivním látkám**.

E-CR-vlákna (Electrical/Chemical Resistant) – **vysoce chemicky odolná bezboritá C-vlákna**. Mají **vyšší permitivitu** ($\epsilon_r = 7$) než bor obsahující E-vlákna ($\epsilon_r = 5,9$ až $6,6$), a nejsou proto používány např. pro desky tištěných obvodů.

AR-vlákna (Alkali Resistant) – **bezalkalická**, s odlišným složením oproti E-vláknům. Mají **vysokou odolnost proti alkáliím** (zásadám) a používají se na vyztužení *betonu*.



Skleněná vlákna se vyrábějí **tažením z trysek**. Ve **sklářské peci** se při teplotě 1400 °C nejprve roztaví **křemičitý písek** společně s dalšími **složkami** (*vápenec, kaolin, kyselina boritá* aj.) na **sklovinu**. Ta je vedena v **tekutém stavu** kanálky do předehřátých **spřádacích trysek** z **platinové slitiny** (cca 200 až 4000 trysek), ze kterých pomalu vytéká a rychle tuhne do tvaru vláken. Vlákná jsou na výstupu z trysky asi **2 mm tlustá**. Kalibrace jejich průměru (např. na $\varnothing$ 10 nebo 14 μm) se provádí **dloužením** na rychle rotujícím navíjecím zařízení při současném **nárůstu jejich délky** (až na 40 000násobek původní délky).



Vlastnosti skleněných vláken



- Skleněná vlákna jsou díky své **amorfní** struktuře **izotropní**, díky tomu jsou jejich materiálové vlastnosti v **podélném** a **příčném směru stejné** (na rozdíl od *uhlíkových* a *aramidových vláken*).
- Jejich **modul pružnosti v tahu** (*Youngův modul*) je přibližně **stejně velký jako u hliníku** a činí asi **jednu třetinu hodnoty oceli**.
- Jejich **pevnost v tahu** je vyšší než u většiny **organických i anorganických vláken** a je většinou **podstatně vyšší než u oceli** (v kompaktní formě). Zároveň má sklo **nižší hustotu** => hodnota **měrné pevnosti** vláken je **zvláště vysoká**.
- **Deformace** skleněných vláken **je elastická**, tj. **nemají visko-elastické chování** jako syntetická vlákna.
- Jejich **tepelné vlastnosti překonávají tepelné vlastnosti jiných materiálů**. Ani dlouhodobé trvalé tepelné namáhání při 250 °C nesnižuje hodnoty jejich mechanických vlastností.

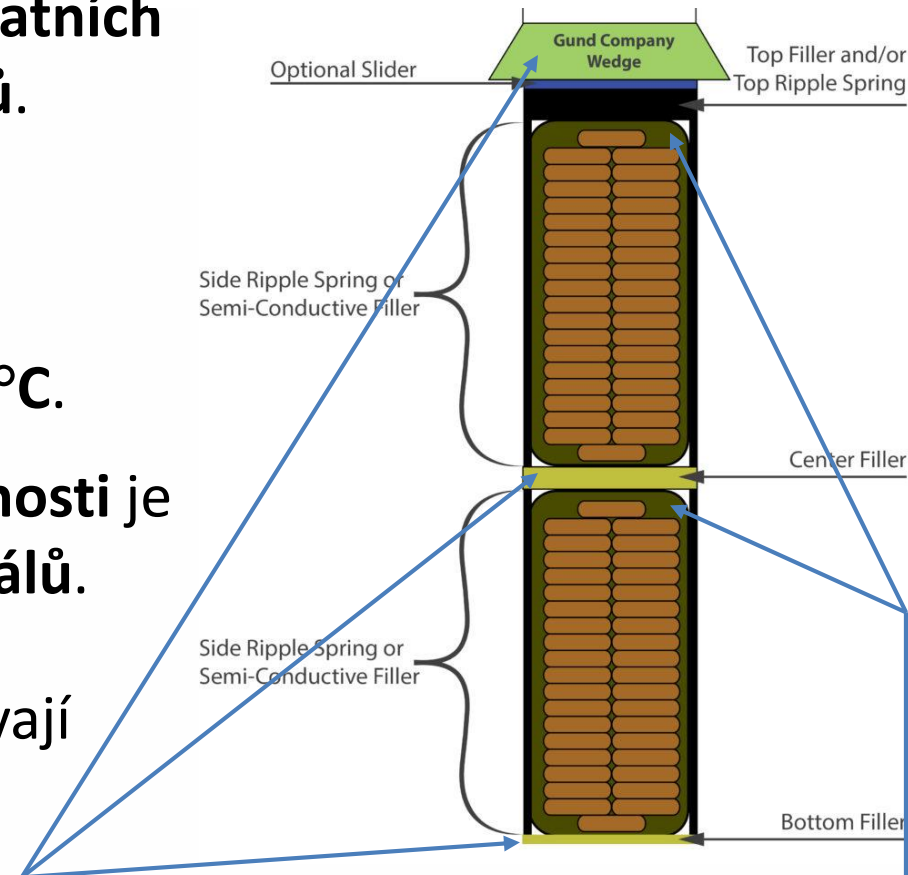


Řez drážkou statoru turbogenerátoru

- Jejich **tepelná vodivost** je **vyšší než u ostatních materiálů**, ale podstatně **nižší než u kovů**.
- Skleněná vlákna jsou **nehořlavá**, a tudíž **ohnivzdorná**.
- **Bod měknutí *E-skloviny*** je **vyšší než 625 °C**.
- Jejich **součinitel teplotní délkové roztažnosti** je **nižší než u většiny konstrukčních materiálů**.

Skleněná vlákna se v elektrotechnice využívají ve formě **výztuže** (nosné složky) pro:

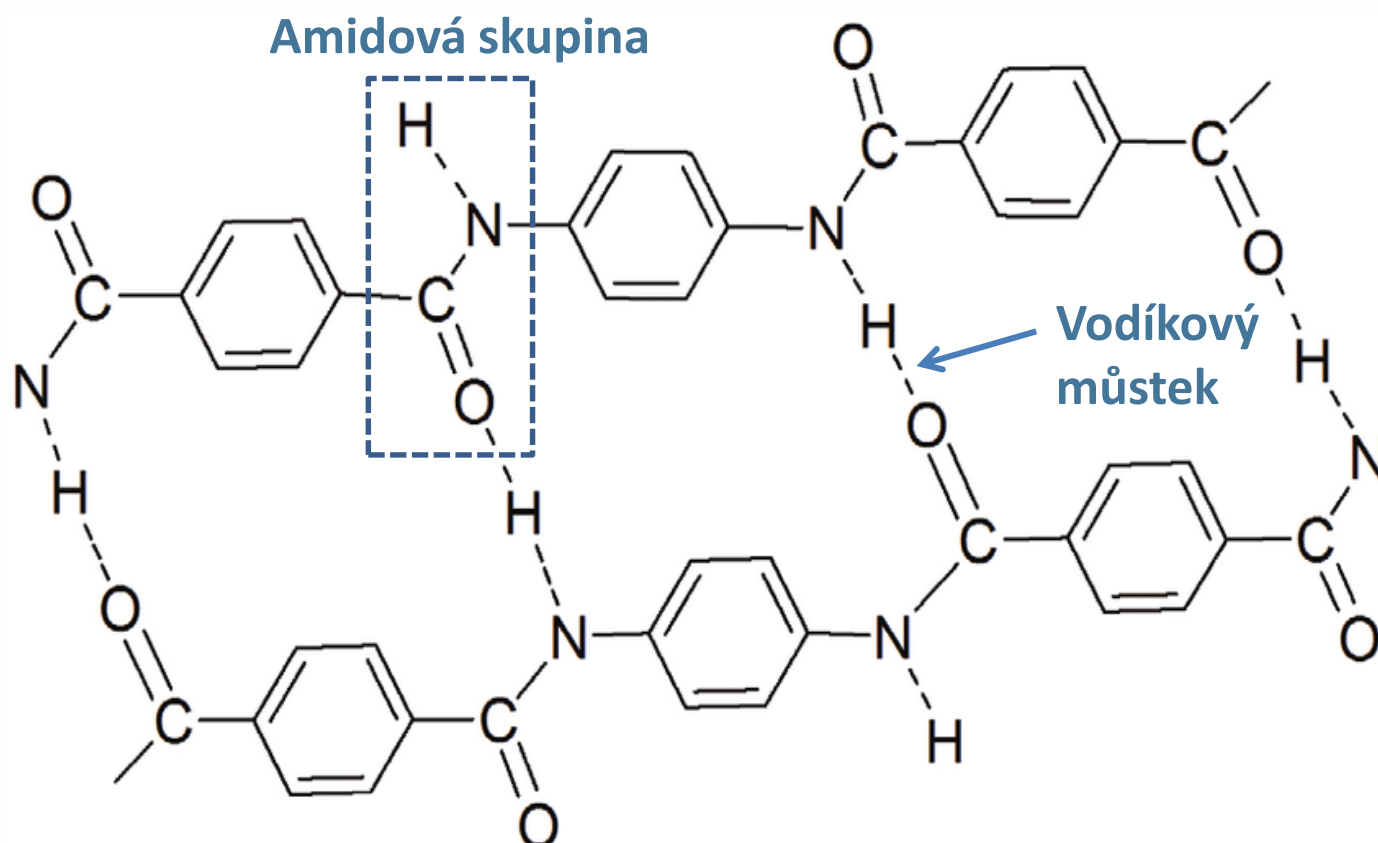
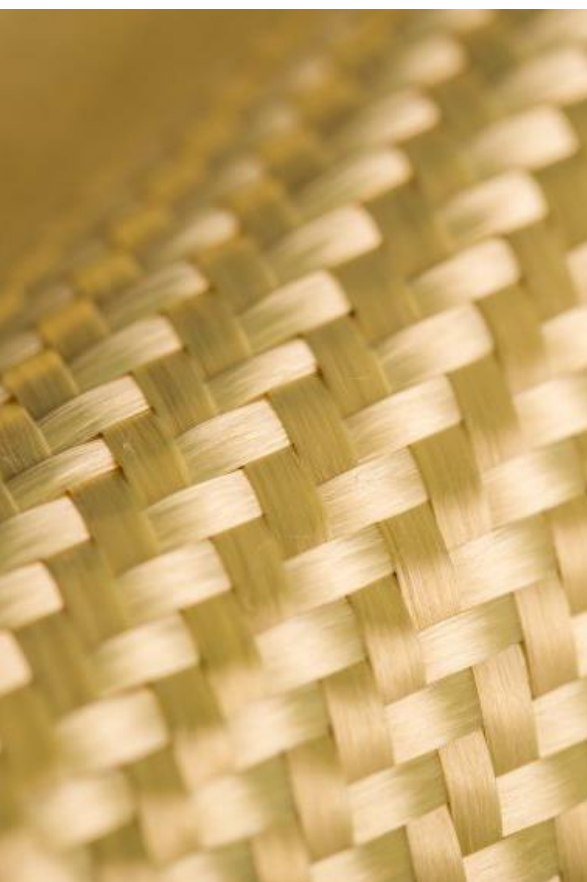
- **konstrukční elektroizolační materiály** = **dvousložkové** kompozitní materiály (*sklo + polymerní matrice*), např. na výrobu *přepážek, krytů, drážkových klínů, desek plošných spojů* apod.
- **materiály na výrobu izolačních systémů** = **třísložkové** kompozitní materiály (*sklo, slídový papír + polymerní matrice*) na výrobu *hlavních izolačních systémů* točivých i netočivých strojů.



b) Aramidová vlákna (AF – Aramid Fiber)

Jsou vlákna vyrobená z **polyamidů** s **dlouhým uhlovodíkovým řetězcem**, z jehož vazeb musí být nejméně 85 % spojeno se **dvěma aromatickými jádry**. Označení „**aramid**“ vzniklo ze spojení slov **aromatický polyamid**.

Kovalentní vazby jsou v *aramidových* vláknech **orientovány podél osy vlákna** => předností těchto vláken je jejich **vysoká pevnost** a **tuhost**.



Pravidelné uspořádání *aromatických jader*, *amidových skupin* a vazeb *vodíkovými můstky* propůjčuje řetězcům **vysokou tuhost** a zajišťuje současně **vysokou hustotu struktury** uspořádání.

Aramidová vlákna se používají v leteckém průmyslu, v armádě (např. na výrobu neprůstřelných vest – *para-amid nylon* známý jako **kevlar**) a jako náhražka *azbestu*.

V **elektrotechnice** nacházejí uplatnění při výrobě elektroizolačních materiálů pro **náročné aplikace** (*vysoká provozní teplota a provozní zatížení, chemicky agresivní prostředí*). Můžeme se s nimi nejčastěji setkat ve formě „*aramidových papírů*“ (např. „*Nomex papír*“ od společnosti *DuPont*), které nacházejí uplatnění jako **kombinované elektroizolační materiály** pro *drážkové izolace, izolace cívek, krycí a vnější izolace* pro toč. a netoč. stroje. Udržují si vynikající tepelné, mechanické a elektrické vlastnosti **až do teploty 200 °C**.



Suchý distribuční transformátor izolovaný *Nomex* papírem (teplotní třída H, tj. 180 °C).

Výroba **aramidových vláken** spřádáním z taveniny není možná, protože teplota jejich tavení leží nad teplotou tepelného rozkladu. Tato **vysoce krystalická vlákna** se silně **orientovanými molekulami** se proto spřádají z vysoce viskózního 20% roztoku **aromatického polyamidu** v koncentrované **kyselině sírové**. Jednotlivá elementární vlákna **se spojují** a pro zlepšení zpracovatelnosti se mnohokrát **propírají**, **neutralizují** a také **opatřují aviváží** pro zlepšení *kluzných a zpracovatelských vlastností*. Vyrobená **aramidová vlákna** se mohou zpracovávat se všemi běžnými **reaktivními pryskyřicemi** i **termoplasty**.



Vlastnosti aramidových vláken



- Jsou **nejlehčími vyztužujícími vlákny** s hustotou = $1,45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, z čehož plyne jejich **vysoká měrná pevnost v tahu**.
- Jsou **silně anizotropní** (např. hodnota jejich *modulu pružnosti* a *pevnosti v tahu* měřená kolmo k vláknu je daleko nižší než hodnota měřená ve směru vlákna).
- Aramidové kompozity jsou **velmi vhodné** pro lehké konstrukce s **převažujícím tahovým namáháním**, nikoli však pro konstrukce namáhané ohybem.
- Jsou **hydrofilní**, tzn. absorbují vlhkost (až do 7 %). Vlhkost negativně ovlivňuje **pevnost spoje** mezi vláknem a matricí a také **pevnost samotného vlákna** => vlákna musí být **před použitím vysušena**.
- Dochází u nich k **výraznému poklesu pevnosti při expozici zářením s vysokou energií** (např. UV záření).



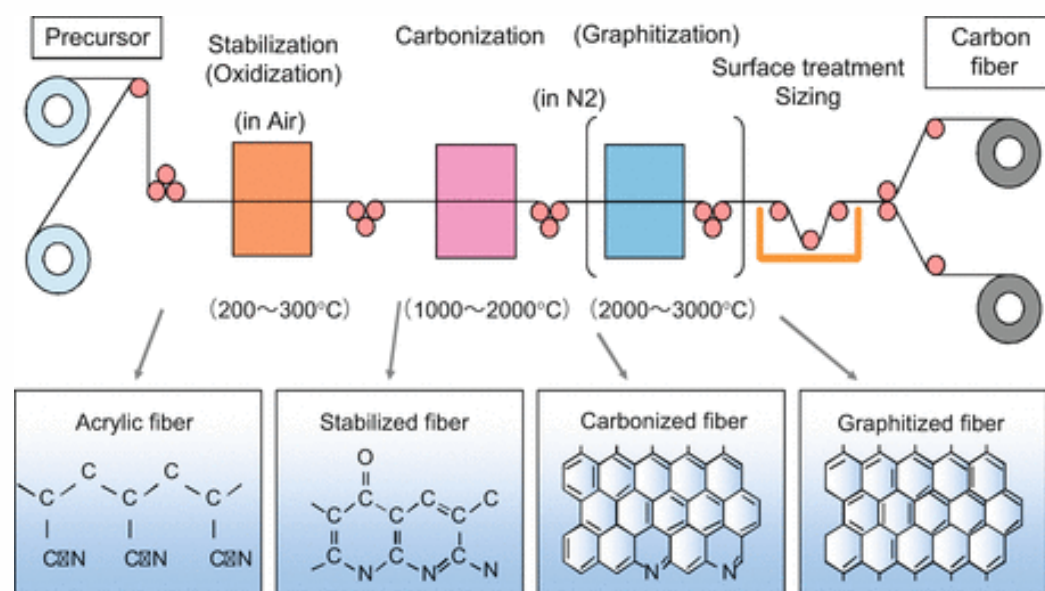
- Aramidová vlákna **odolávají teplotě až 300 °C** (ve formě kompozitu) a díky tomu patří v elektrotechnice **ke špičkovým elektroizolačním materiálům**.
- Aramidová vlákna se při vysoké teplotě **neroztaví**, => jsou vhodná např. na výrobu **protipožárních ochranných obleků, rukavic** apod.
- **Adheze** aramidových vláken **k matrici je často nižší** než u ostatních materiálů.
- Vytvrzené konstrukční prvky z aramidových kompozitů **se obtížně obrábějí**.



c) Uhlíková vlákna (CF – Carbon Fiber)

Jsou technická **vlákna** s **extrémně vysokou pevností** a **tuhostí**, ale s **nízkou tažností**.

Výchozí **organické suroviny ve vláknitém tvaru** jsou při výrobě nejprve **teplotně stabilizovány** a následně **karbonizovány**. Přitom se odštěpí téměř všechny prvky až na **uhlík**. Se stoupající teplotou, a tím se zvyšující **grafitizací**, se zlepšují **mechanické vlastnosti**. Při teplotě 1800 °C je tvorba **grafitové struktury** ukončena a výsledné vlákno obsahuje 85 – 95% **uhlíku**. Může následovat **grafitizace** při teplotě 2 400 až 3 000 °C. Pokud se provede, vznikají tzv. **grafitová vlákna** s obsahem **uhlíku** cca 99 % a více.



Jako **výchozí surovina** (*prekurzor*) pro výrobu uhlíkových vláken se vždy používá jeden z následujících materiálů:

- **Polyakrylonitril (PAN)** – používá se od roku 1980 stále častěji, vlákna z něj vyrobená jsou dnes považována za „**standardní**“ **uhlíková vlákna**.
- **Celulóza** – uhlíková vlákna vyrobená z celulózy mají **méně dokonalou strukturu** a používají se převážně jako **izolačním materiály pro vysoké teploty**.
- **Izotropní uhelná nebo anizotropní mesofázová smola** – jedná se o zbytky po destilaci *ropných dehtů* nebo *dehtů z černého uhlí*. Tato vlákna mají **velmi vysokou hodnotu modulu pružnosti v tahu** a **velice dobré tepelné a elektrické vlastnosti**, ale jejich **pevnost v tlaku** je ve srovnání se *PAN uhlíkovými vlákny* **podstatně nižší** (mají řidší vazby mezi jednotlivými grafitovými rovinami).



Vlastnosti uhlíkových vláken



- Zachovávají si **vysokou pevnost** a **modul pružnosti v tahu** až do teploty **500 °C**.
- Mají **nízkou hustotu** ($1,6$ až $2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) a **mimořádně vysokou korozní odolnost** (neodolávají pouze *silně oxidačnímu prostředí*).
- Mají **dobrou elektrickou a tepelnou vodivost** a jsou **silně anizotropní** (stejně jako *aramidová vlákna*).
- Za normálních podmínek jsou **velmi křehká** a při zpracování se **snadno lámou**, proto se upravují tzv. **apretací** na bázi *epoxidové pryskyřice*, která slouží jako ochrana při zpracování a také vylepšuje vazbu vláken s matricí.
- Dobře **propouštějí záření** a **neodráží radarový paprsek** („*stealth*“ technologie).
- Mají **vysokou odolnost** vůči **dlouhodobému dynamickému namáhání** (lepší než u všech ostatních materiálů, např. *hliníku a oceli*).
- V elektrotechnice doposud **nenašla významné uplatnění**.



d) Přírodní vlákna

Pro vyztužování **polymerních matric** jsou ze všech přírodních vláken vhodná pouze **vlákna rostlinná**, která mají jako základ **celulózu**. Mezi ně patří *len*, *konopí*, *sisal*, *juta* a *bavlna*. Jejich výhodou je **odolnost proti stárnutí** a **čichová nezávadnost** při měnících se **klimatických podmínkách**. Pozoruhodná je i jejich **pevnost v tahu**. Vzhledem k **nízké měrné hmotnosti** jsou tato přírodní rostlinná vlákna zajímavou surovinou pro **lehké konstrukce**.

Další přednosti přírodních vláken: nízká hustota, malá abrazivita při mechanickém opracování, **výhodná likvidace spalováním**.

Nedostatky přírodních vláken: vlastnosti závislé na podmínkách růstu, citlivé na **působení vlhkosti**, možnost **biologického napadení**, nebezpečí rozkladu vláken při **vysoké teplotě** zpracování (nad 200 °C) => omezený výběr matric, nutná úprava pro zlepšení vazby s matricí.



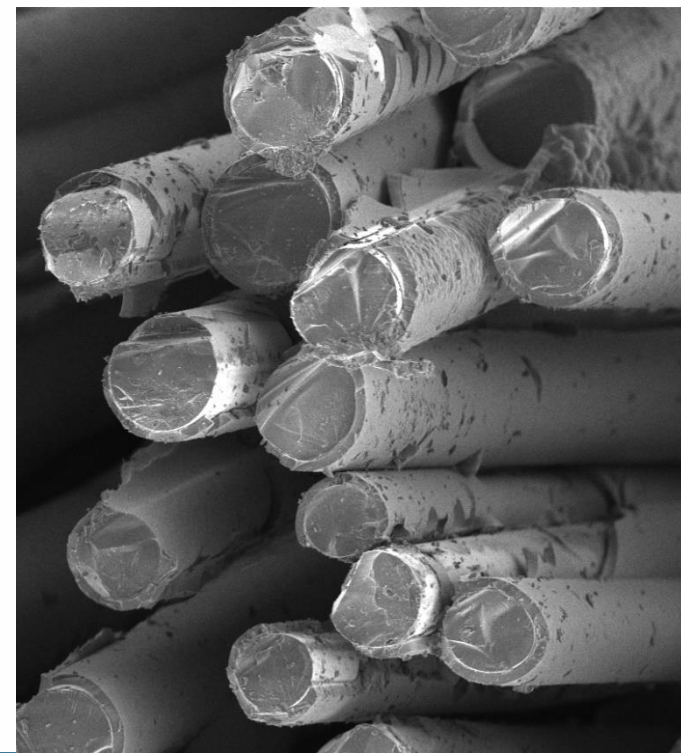
II. MATRICE - POJIVO

Pod pojmem **matrice** se rozumí **materiál**, kterým je **prosycena zpevňující fáze** tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek (**kompozit**).

Úkolem matrice je:

- zaručení **geometrického tvaru** kompozitu,
- **zavedení a přenos sil** mezi **matricí** a **zpevňující fází** i mezi jednotlivými **komponenty zpevňující fáze** (vlákna nebo částice),
- **ochrana zpevňující fáze**.

Zásadním hlediskem pro **kvalitu kompozitu** je zajištění **adheze** na fázovém rozhraní **matrice-vlákno**. Pro zlepšení fyzikální a chemické vazby mezi vláknem a matricí se může vlákno ošetřit **apretací** (předúpravou výztuže pomocí *lubrikace*) vhodné pro daný druh matrice. Matrice musí mít vhodnou **viskozitu** a **povrchové napětí**, aby **vlákno smočila úplně a bez bublin**.



U **polymerních kompozitů** rozlišujeme jak *reaktoplastické*, tak *termoplastické matrice*, přičemž ty reaktoplastické tvoří většinu kompozitních aplikací.

Reaktoplastické matrice mají (oproti *termoplastickým*) tyto **výhody/nevýhody**:



- ve výchozím stavu (před zpracováním) jsou **nízkomolekulární** a v **tekutém stavu** (s nízkou viskozitou) – viz tabulka dále;
- i v případě, že jsou zpracovány ve formě taveniny, je jejich **viskozita nižší** než viskozita **taveniny z termoplastů**;
- snadněji se **zpracovávají**, **smáčejí** a **lépe prosycují** vyztužující fázi;
- jejich zpracování je **méně energeticky náročné** (nižší teplota zpracování);
- mají **vysokou tepelnou odolnost** a **odolnost proti chemickým vlivům**;
- mají **nižší houževnatost** (určité zlepšení lze dosáhnout přidavkem modifikačních přísad), jsou **křehké** a mají **malou tažnost**;



- v průběhu jejich zpracování probíhá řada **chemických dějů**, které mohou mít **negativní vliv** na **lidské zdraví** a **životní prostředí**;
- v průběhu zpracování termoplastů probíhá pouze **roztavení** a **ztuhnutí matrice**.

The Proper
Respirator Mask

For Working With Resin



Matrice	Teplota zpracování	Viskozita při teplotě zpracování
<i>Nenasycená polyesterová pryskyřice (UP-R)</i> vytvrzovaná za studena	10 až 40 °C	stovky mPa · s
<i>Nenasycená polyesterová pryskyřice (UP-R)</i> vytvrzovaná za tepla	≈ 140 °C	≈ 1 000 mPa · s
<i>Nevyztužená epoxidová pryskyřice (EP-R)</i> vytvrzovaná za tepla	např. 130 °C	stovky mPa · s
<i>Polypropylen (PP)</i>	200 až 270 °C	10 ³ Pa · s
<i>Polyetherketon (PEEK)</i>	≈ 350 až 400 °C	10 ³ až 10 ⁴ Pa · s

a) Termoplastické matrice

Termoplast prosycuje vlákna v **roztavené fázi**, což je vzhledem k její řádově vyšší viskozitě **problematictější proces** než u *reaktoplastů*. Z tohoto důvodu jsou zapotřebí zařízení, která urychlují prosycování vyztužující fáze působením vnějších sil – **lisy, vstřikolisy**.

Pro sériovou výrobu **vstřikováním** jsou vhodné **termoplastické lisovací hmoty vyztužené krátkými vlákny** (o délce cca 0,2 mm) – jsou **běžně používány** a jejich podíl na trhu je daleko **vyšší** než podíl kompozitů s reaktoplastickými matricemi. Pro **velmi namáhané aplikace** se používá *PP, PA, PI* a mnohé jiné termoplasty vyztužené 50ti a více procenty *skleněných* nebo *uhlíkových vláken*.



Menší, ale stále rostoucí skupinu, tvoří **termoplasty vyztužené rohoží** nebo **tkaninou** zpracovávané na velkoplošné dílce **lisováním** – např. termoplasty vyztužené skleněnými vlákny dosahují hodnot mechanických vlastností ve velmi širokém rozsahu.

b) Reaktoplastické matrice

Jedná se o **kapalné** nebo **tavitelné pryskyřice**, které se buď samostatně, nebo za pomoci jiných složek (*tvrdidel*, tj. *iniciátorů*, *katalyzátorů*, *urychlovačů* apod.) vytvrzují **polyadicí** nebo **polymerací** bez **odštěpení těkavých složek**.

Reaktivní pryskyřice nazýváme také *licí*, *laminační*, *impregnační*, *prosycovací* nebo *zalévací pryskyřice*.

Mezi nejdůležitější typy patří:

- *nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R),*
- *vinylesterové (VE-R) / fenakrylátové (PFA-R) pryskyřice,*
- *epoxidové pryskyřice (EP-R),*
- *fenolické pryskyřice,*
- *metakrylátové pryskyřice (MA-R) a*
- *izokynátové pryskyřice.*



Kompozity s reaktoplastickou matricí se rozlišují podle toho, zda obsahují:

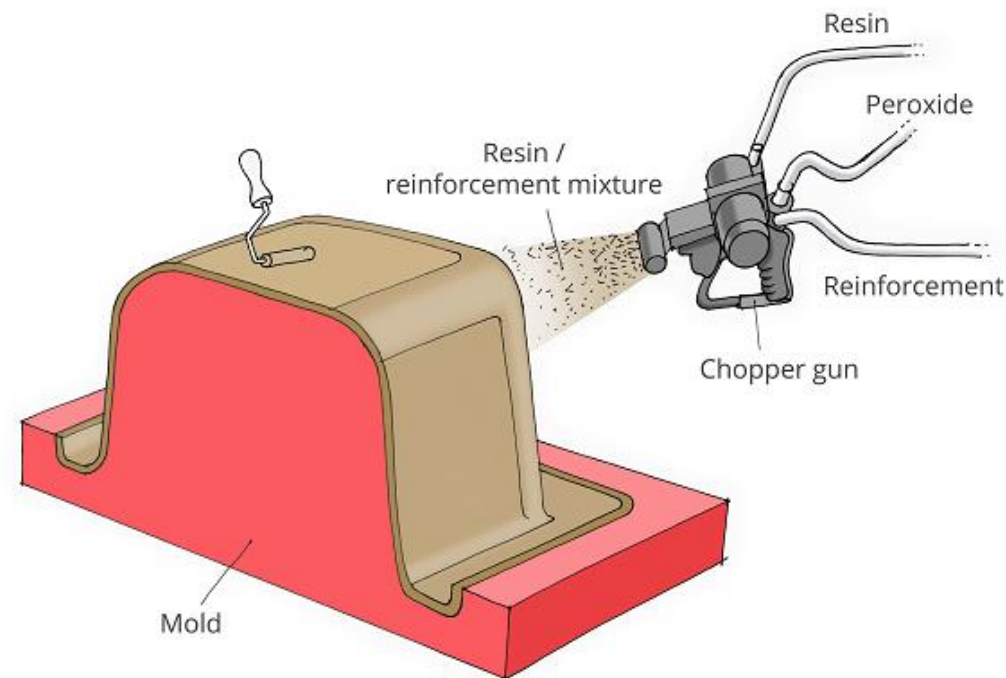
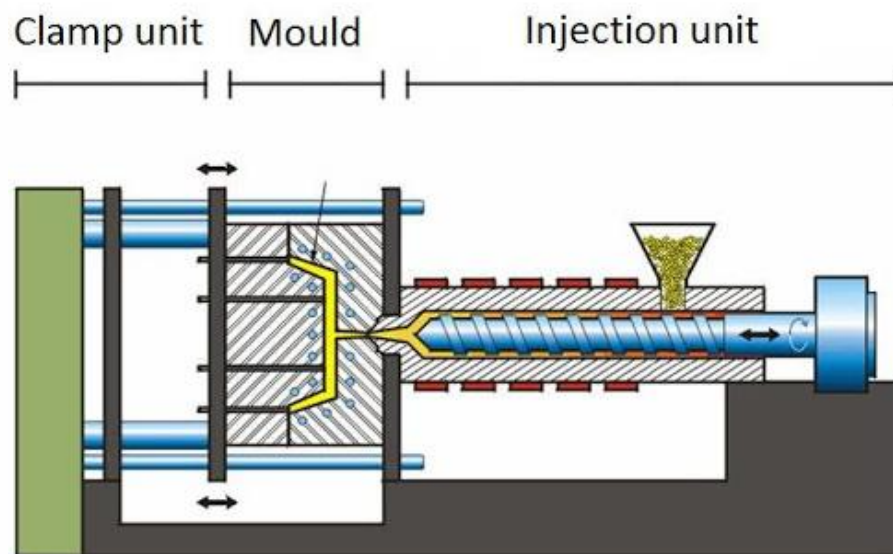
- ***Nepravidelně rozdělená krátká vlákna*** (s délkou 6 až 75 mm) vhodné pro **lisování** nebo **vstřikování**.
- ***Tkaniny a rohože prosycené pryskyřicí***, např. **lamináty** vyztužené **tkaninou** nebo **rohoží** zpracovávané **ručním kladením**. Tyto technologie se využívají pro malosériovou výrobu velkoplošných dílů (např. *čluny*, *lopatky větrných elektráren* apod.).



10.4 Výrobní a zpracovatelské technologie

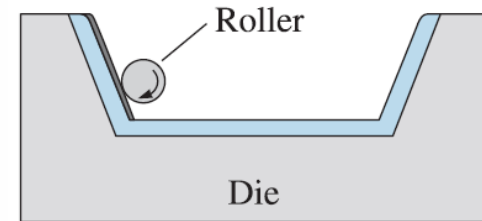
Existuje celá řada způsobů výroby kompozitů, jejichž použití závisí na **cílové aplikaci** a **použitých materiálech**.

Kompozity s krátkými vlákny jsou obvykle zpracovávány smícháním vláken s **reaktoplastickou** nebo **termoplastickou** matricí a poté, za použití konvenčních technik, jako je **vstřikování** (*Injection Molding*) nebo **odlévání** (*Casting*) dále zpracovány na konečný výrobek. Polymerní kompozity s krátkými vlákny mohou být také **rozprašovány** (*Spray-Up Method*) do předem připravených forem.

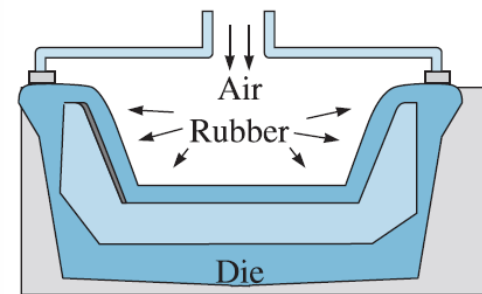


Pro výrobu **kompozitů z nekonečných vláken, tkanin nebo rohoží** byla vyvinuta celá řada speciálních technik.

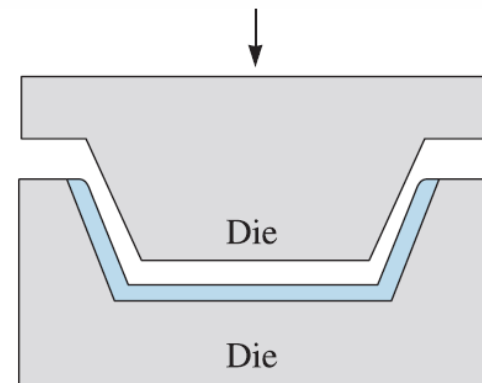
Při **ručním nanášení** (*Hand Lay-Up*) jsou **vyztužující pásy, tkaniny** nebo **rohože** umístěny do formy, nasyceny pryskyřicí, **ručně válcovány** pro zajištění dobrého kontaktu výztuže/matrice a omezení výskytu vzduchových bublin a nakonec vytvrzovány za zvýšené teploty.



Výztuž může být také umístěna do formy a dále formována pomocí **speciálního vaku** ze *silikonového kaučuku* a **tlaku plynu** či **vakua** – tzv. **technologií VBM** (*Vacuum Bag Molding*). Tlak plynu nebo vakuum jsou využity k propojení jednotlivých vrstev výztuže s matricí během vytvrzování.

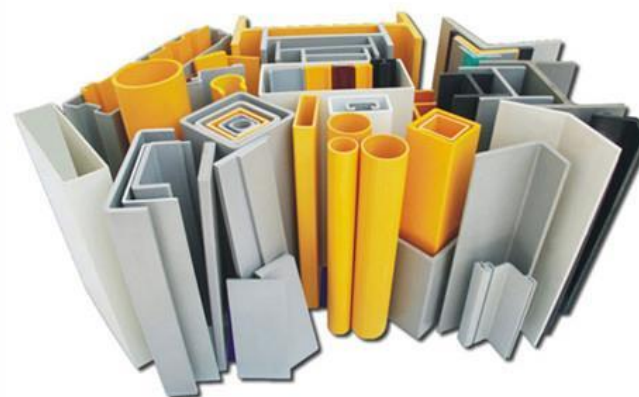
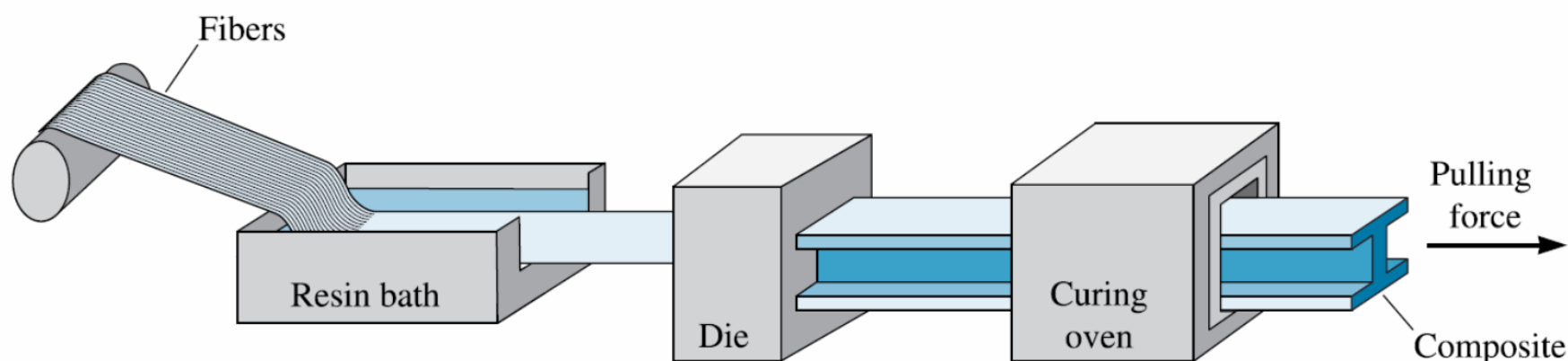


Pro výrobu kompozitů tohoto typu může být využito také prostého **lisování** (*Matched Die Molding*) pomocí předem vytvořených forem, kdy je k propojení vrstev kompozitu použit **mechanický tlak čelistí lisu**.

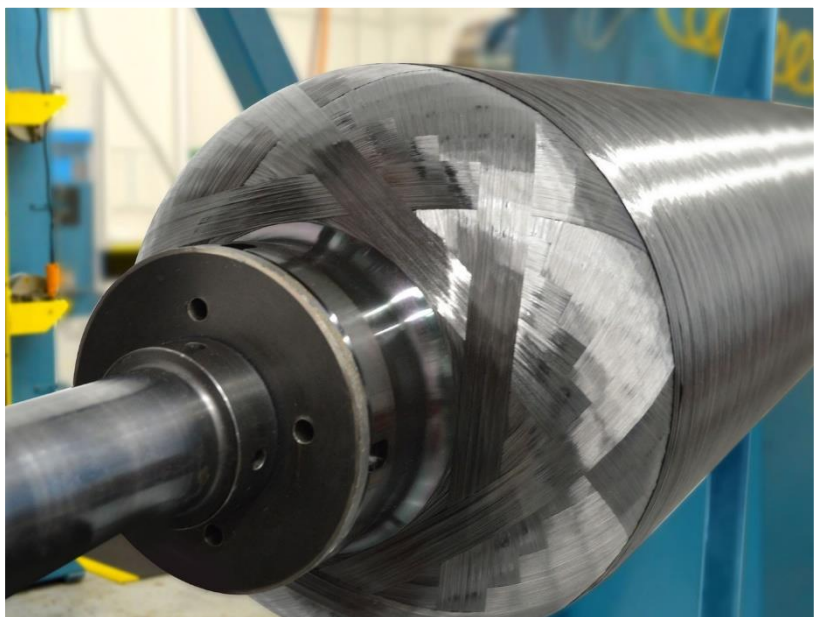
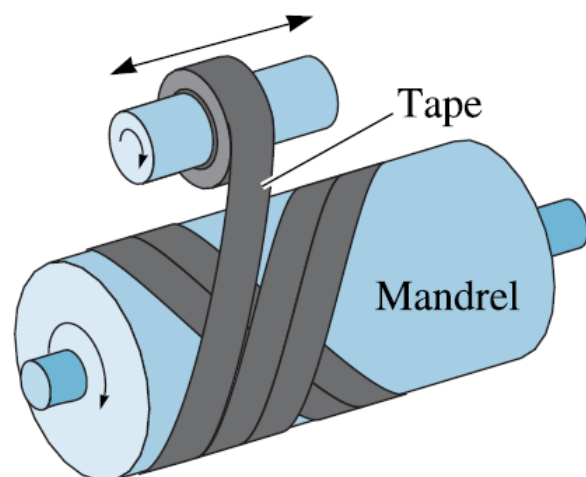


Pro **kontinuální výrobu kompozitů** se používají technologie (i) **tažení** (*Pultrusion*) a (ii) **navíjení** (*Filament Winding*), při nichž se *nekonečná vyztužující vlákna* (příp. *tkaniny, rohože*) **kontinuálně prosycují pryskyřicí**.

a) Pultruze – při pultruzi probíhá tvarování a vytvrzování **protahováním průvlakem**, který tvoří **výměnné profily**. Pomocí pultruze se mohou vyrábět i složitěji tvarované kompozity se **stejným profilem v celé jejich délce**.

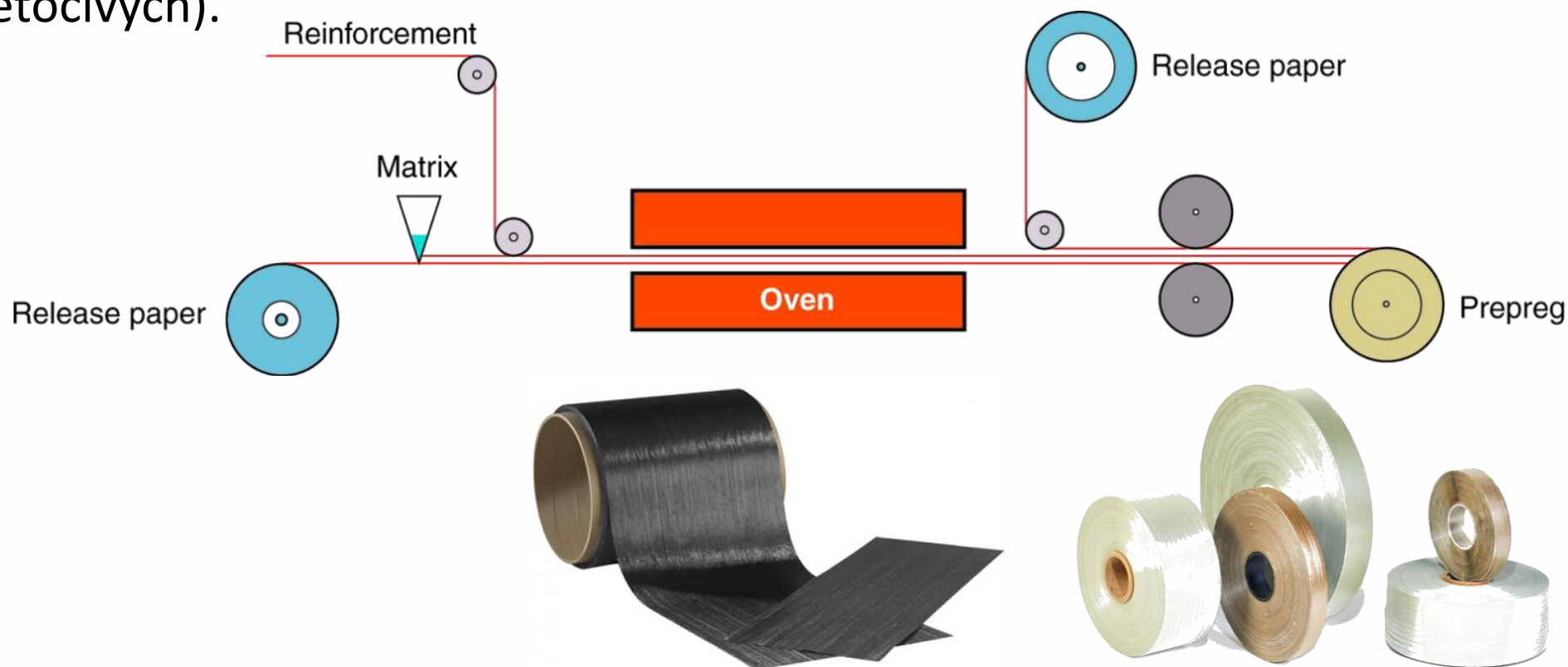


b) Navíjení – provádí se **navíjením** prosycených výztuží na **otáčející se trn**. Tímto způsobem se vyrábějí **rotačně symetrická tělesa** (roury, nádrže a tlakové zásobníky).



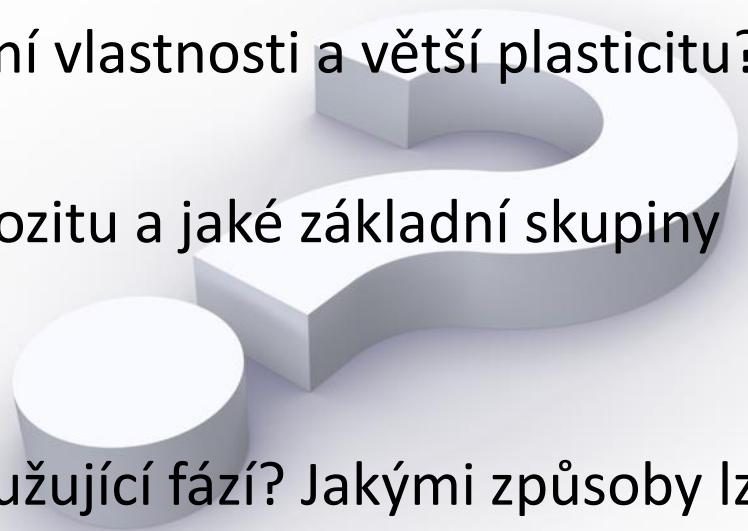
Pro výrobu kompozitů se často používají také **předimpregnovaná vlákna, tkaniny a rohože**, tzv. **prepregy** (*Prepregs – Preimpregnated Fibers*), které se následně zpracovávají **lisováním** nebo v **autoklávu**.

Prepregy mají výhodu v tom, že je **oddělen složitý proces prosycování výztuže pojivem** (provádí **výrobce prepregů**) od **dalšího zpracování** (provádí **odběratel**). Tyto polotovary mají **pro elektrotechniku velký význam**, protože se využívají při výrobě **hlavních izolačních systémů el. strojů** (točivých i netočivých).



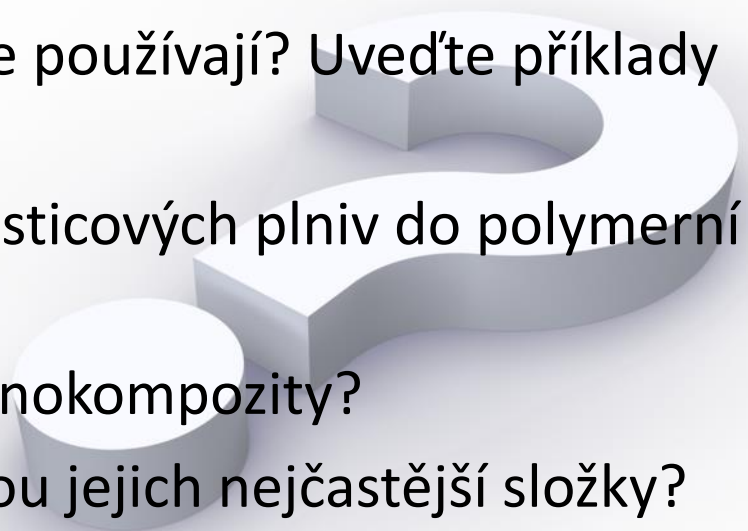
Kontrolní otázky

- Vysvětlete, co je to matrice a co vyztužující fáze kompozitu?
- Lze považovat výztuž za spojitou nebo nespojitou fázi?
- Popište důvody, proč lidstvo (i příroda) používá kompozitní materiály?
- Popište, jaké musí splňovat vícefázový materiál kritéria, aby mohl být chápán jako kompozit?
- Jaké jsou základní funkce matrice v kompozitu a jaké základní typy matic znáte?
- Jaká složka kompozitu má nižší pevnostní vlastnosti a větší plasticitu? Matrice nebo výztuž?
- Jaké jsou základní funkce výztuže kompozitu a jaké základní skupiny výztuží znáte?
- Co jsou to „whiskery“?
- Jaká je role rozhraní mezi maticí a vyztužující fází? Jakými způsoby lze ovlivnit jeho vlastnosti?



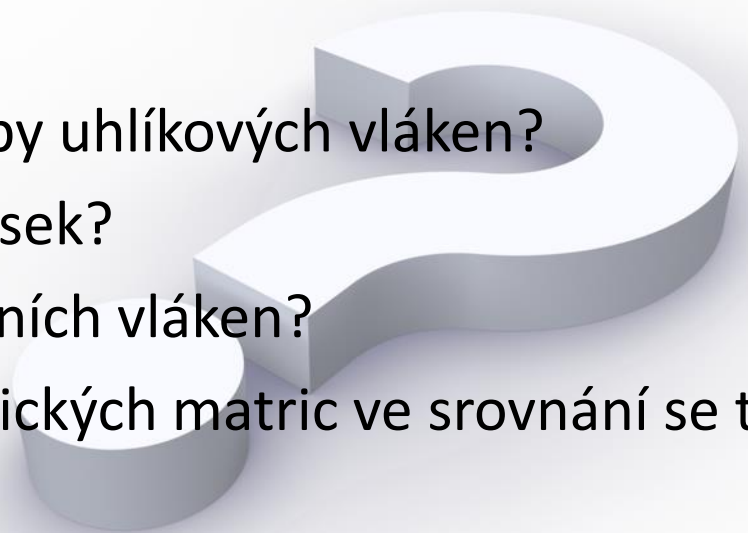
Kontrolní otázky

- Jaké jsou nevýhody kompozitních materiálů?
- Uveďte několik příkladů kompozitních materiálů vyrobených člověkem, které nás v běžném životě obklopují. Z čeho jsou složeny?
- Uveďte několik příkladů přírodních kompozitních materiálů, které nás v běžném životě obklopují. Z čeho jsou složeny?
- Co je to „synergický účinek“ složek kompozitu?
- Jaké jsou přednosti kompozitů s polymerní matricí?
- Co jsou to částicové kompozity a proč se používají? Uveďte příklady nejčastěji používaných plniv.
- Jaká negativa může přinést začlenění částicových plniv do polymerní matrice?
- Jaký je rozdíl mezi mikrokompozity a nanokompozity?
- Co jsou to vláknové kompozity a jaké jsou jejich nejčastější složky? Jmenujte konkrétní příklady.



Kontrolní otázky

- Popište typické vlastnosti jednotlivých typů vyztužujících vláken a způsoby jejich výroby.
- Jaká vyztužující vlákna se používají v elektrotechnice nejčastěji?
- Jaký je rozdíl mezi E-vláknem a E-CR-vláknem?
- Jaká vlákna mají nejnižší hustotu a tím pádem i nejvyšší měrnou pevnost v tahu?
- V jakých aplikacích se v elektrotechnice používají aramidová vlákna? V čem se liší od vláken skleněných?
- Jaké rozlišujeme základní způsoby výroby uhlíkových vláken?
- Která z vláken neodrážejí radarový paprsek?
- Jaké jsou přednosti a nedostatky přírodních vláken?
- Jaké jsou výhody/nevýhody reaktoplastických matric ve srovnání se těmi termoplastickými?
- Co znamená zkratka „PA6 GF20“?



Kontrolní otázky

- Jaké druhy pryskyřic se používají pro výrobu polymerních kompozitních materiálů s reaktoplastickou matricí?
- V čem spočívá technologie „Spray-Up“?
- Co je to „Injection Molding“?
- Co lze a nelze vyrábět pultruzí?
- Co jsou to „prepregy“ a kde se používají?

