

Obsah

VLÁKNA PRO KOMPOZITY.....	2
Typy produkt z vláken	3
SKLEN Ā VĀKNA.....	7
Složení.....	7
Úprava povrchu sklen Āných vláken	10
Výrobky ze sklen Āných vláken.....	10
Sklen Ā optická vlákna	14
Sklen Ā optická vlákna jako senzory („chytrā“ optická vlákna, “Smart Fibres”)	15
Safírovā optická vlákna.....	16
UHLÍKOVĀ VLÁKNA.....	17
Mikrostruktura uhlíkových vláken	17
Hlavní druhy uhlíkových vláken.....	26
Sou Āsní výrobci uhlíkových vláken.....	32
N které webové adresy pro uhlíková vlákna	34
Úprava povrchu uhlíkových vláken	36
Zna Āní uhlíkových vláken	36
Uhlíková vlákna SBCF (“Stretch Broken Carbon Fiber”)	37
Krátkā uhlíková vlákna VGCF (“Vapour-Grown Carbon Fibers”).....	37
Uhlíková vlákna z nanotrubi ek.....	31
Uhlíkové whiskery GCN (“Grown Carbon Nanoparticles”)	34
Levnā uhlíková vlákna pro automobilovĀ pr Āmysl (“low-cost carbon fiber”, LCCF	34
Poniklovanā krátkā uhlíková vlákna	34
POLYMERNĀ VLÁKNA	35
Aromatické polyamidy (aramidy, APA).....	36
Polyethylentereftalátovā vlákna (PET)	37
Polyetherimidovā vlákna (PEI).....	38
Polybenzimidazolovā vlákna (PBI)	38
Polyimidovā vlákna (PI)	38
Polyketonovā vlákna (POK)	38
Vlákna z aromatických polyetherketon (PAEK, polyaryletherketon).....	38
Polyfenylsulfidovā vlákna (PPS).....	39
Vlákna UHMWPE	39
Vlákna HMPP (vysokomodulovā vlákna polypropylenu).....	39
Vlákna z termotropních aromatických kopolyester (LCP,“Liquid Crystal Polymer”).....	40
Vlákna na fenol-aldehydovĀ bázi.....	40
Vlákna PBO	41
Vlákno PBZT.....	41
Vlákno PBOH.....	41
Vlákno M5 (PIPD)	41
Vlákna z polyester naftalátovĀho typu, polyethylen-naftalát (PEN) a polybutylen-naftalát (PBN).....	42
EDI OVĀ VLÁKNA	42
PROTEINOVĀ VLÁKNA (VLÁKNA PAVOU Ā)	43
P ĀRODNĀ VLÁKNA Z ROSTLIN.....	45
P ĀRODNĀ JĀDRO SENDVI Ā-BALZA	48
P ĀRODNĀ MINERĀLNĀ VLÁKNA	47
VLÁKNA PRO VYSOKOTEPLTNĀ APLIKACE.....	48
Borovā vlákna	48
SiC kontinuālnĀ vlákna	48
Al ₂ O ₃ kontinuālnĀ vlákna.....	49
Si ₃ N ₄ vlákna	50
Diamantovā vlákna	50
PIEZOELEKTRICKĀ KERAMICKĀ VLÁKNA (PZT).....	52
WHISKERY (BEZDEFEKTNĀ MONOKRYSTALY).....	53

Bezpečné tenění PDF soubor je možné pouze s počítačem s vyšším operačním systémem (Windows 7, 8, 9 a 10). Počítač se systémem Windows XP nejsou bezpečné (i když Microsoft chystá "security update" pro IE a systém XP, oznámeno po útoku května 2014). Pro tenění PDF soubor je možno použít například program Adobe Acrobat Reader DC. Má poslední verzi 2015.009.20077. V programu vybranou stránku zobrazíme stisknutím Ctrl+Shift+n, napsáním čísla stránky numerickou klávesnicí a potvrzením klávesou Enter. PDF soubory je možné prohlížet také pomocí Google Chrome (poslední verze je 54.0.2840.71 m), programem PDF Editor 5 (placený program společnosti CAD-KAS). Odkazy jsou, až na malé výjimky, psány v angličtině. Všechny absolutní odkazy vedou na bezpečné webové stránky (prověřeno WOT, McAfee SiteAdvisor a Norton Safeweb).

VLÁKNA PRO KOMPOZITY

<http://www.fibersource.com/f-tutor/prods.htm>

Chemické názvy jsou psány podle doporučení „Psaní převzatých slov“, diplomová práce VŠCHT

Nejvyšší pevnost a tuhost dosahují vláknové kompozity s kontinuálními vlákny Matrice (pojivo výztuže) mohou být:

- přírodní (bio-pryskyřice)
- polymerní (reaktoplastická nebo termoplastická)
- kovová
- skleněná
- sklokeramická
- keramická
- uhlíková

Kontinuální vlákna mohou být:

- skleněná
- epioxidová
- uhlíková
- polymerní
- rostlinná
- bavlněná
- borová
- keramická

Vláknové **mikrokompozity** obsahují vlákna o průměru 10^0 až 10^2 μm . Některé kompozity obsahují vlákna v podobě nanovláken a zařazují se proto mezi **nanokompozity**.

Pevnost vlákna je vždy významně vyšší než pevnost stejného materiálu v kompaktní formě. Příčinou je malý povrchový vad je při velmi malých průměrech menší (tenká vlákna mají oproti stejnému dlouhým vláknům v tlustších průměrech významně menší povrch). Vady existují jen v podobě submikroskopických až mikroskopických trhlinek a dutinek, které jsou jednoduše orientovány (protaženy) v podélném směru vlákna. Whiskery jsou monokrystaly o velmi malých průměrech (nm) a krátké délce. Dosahují velmi vysoké pevnosti (řádově 10^4 MPa), protože neobsahují defekty.

Typy produktů z vláken

Sdružením elementárních vláken (monovláken) vznikají prameny. Ty jsou dále zpracovány na následující polotovary

- **selané prameny** (angl. "chopped fibers"). Jsou určeny pro přípravu lisovacích a vstřikovacích směsí, prameny jsou nasekány na potřebné délky
- **mletá vlákna** (angl. "milled fibers"). Mletím lze získat krátká vlákna jen v případě křehkých vláken)
- **prameny bez zákrut** a se zákruty
- **rovinky (pramence, kábílky)** (angl. "tow") jsou sdružené prameny s nulovým nebo malým počtem zákrut (méně než 40 zákrut/m) pro výrobu profilů tažením, pro navíjení a pro výrobu prepregu. Jsou dodávány na válcových cívkách o vyšší hmotnosti (u skleněných vláken do 15 kg). Pro výrobu tkanin jsou rovinky dodávány na menších, kónických cívkách o jemnosti kolem 3K (číslo udává kolik tisícovek elementárních vláken je v rovinku). V metrické soustavě je udávána v tex. Tex je také délková (lineární) hustota, jednotkou je g/km. Udává kolik gramů má 1000 m vlákněného produktu. Často je použita i vyšší jednotka dtex, která udává počet gramů na 10000 m vlákněného produktu. Starší míra je denier, hmotnost v gramech při délce produktu 9000 m.
- **jednoduchá příze** (angl. "yarn") a **kablovaná příze** vzniká zkrucováním pramenů a jejich sdružováním. Používá se pro výrobu technických tkanin.
- **rovinkové tkaniny** (angl. "fabrics"), tkané z rovinky. Jsou určeny pro kontaktní laminování, pultruzi, navíjení a výrobu tkaninových prepregů. Nejvýznamnější charakteristikou tkaniny je tzv. „gramáž“, která udává hmotnost g/m^2 (udává též jemnost tkanin) a typ textilní vazby (plátno, kepr atlas).

<http://www.Youtube.com/watch?V=OrlfucQ6Mpo&feature=related>

- **TeXtreme®**, tkaniny švédské firmy Oxeon <http://www.oxeon.se/index.php?Page=textreme> jsou vyráběny tkaním pásky. Technologie umožňuje vytvářet hybridní tkaniny (obsahují vedle uhlíkových pásek i pásy s polymerními vlákny (s polymerními vlákny mohou být tkaniny až o 20 % lehčí než obvyklé tkaniny)). Oproti běžným tkaninám mají tkaniny menší množství otvorů (umožní dosáhnout velký objemový podíl vláken) a vlákna nejsou vzájemně rozprostřena. Produkt TeXtreme® se dodává v podobě pásu (šířka 20–50 mm) nebo tkaniny (šířka 300–1500 mm). Svazek vláken musí být rozprostřen. Pásy a tkaniny mohou mít různé tvary výtzuže. Uložení pásky [0/90] je znázorněno na obrázku



- **hybridní tkaniny** kombinují vlákna různých druhů, například uhlíková+aramidová vlákna, uhlíková vlákna+skleněná vlákna
- **tkaniny z příze** nejsou určeny pro výrobu kompozitních konstrukcí, ale slouží jako izolační tkaniny, filtrační tkaniny a geotextilie (technické tkaniny)
- **rohože** (angl. “mat”) jsou netkané textilie, rovinná. Tvorbou je v rovinné poloze nahodile uspořádaná kontinuální vlákna nebo sekané prameny v určité délce (cca 25–50 mm). Sekaná vlákna jsou v rohoži spojena polymerními pojivky rozpustnými v rozpouštědlových pryskyčicích. Použijí-li se k výrobě rohoží kontinuální vlákna, není zapotřebí udržet jejich vzájemnou polohu pojivkem (vlákna jsou vzájemně propletena). Podobně jako tkaniny jsou i rohože charakterizovány gramáží.
- **prepregy** (angl. “prepregs”, vyslovují „pripregy“) <http://www.merriam-webster.com/dictionary/prepregs> Jsou to různé široké rohože nebo kotouče, obsahující buď paralelně uspořádané rovinné tkaniny nebo rohože a polovytvrzenou reaktoplastickou nebo termoplastickou matici. Je možné též vyrobit pramenový prepreg, kde svazek vláken je impregnován reaktoplastickou nebo termoplastickou maticí.

Poslední druh polotovaru (prepregy) se používá k získání špičkových polymerních kompozit. Při výrobě prepregu je na paralelně vedené rovinné tkaniny nanášen reaktoplast. Tkaniny se impregnují v tenké vrstvě roztokem pryskyčice. Pro přípravu jsou vhodné pryskyčice epoxidové, fenolformaldehydové, kyanesterové, bismaleinimidové, benzoxazinové, ftalonitrilové, polyhinoxalinové a polyimidové, ale prepregy se připravují i z polyesterových a vinyloxyesterových pryskyčic. V prepregu je pryskyčice ve stavu B, kdy již vzniklo zesíťování molekul, ale síť má zatím velmi malou hustotu (pryskyčice je ve stavu lepivého gelu).

Prepreg je opatřen z jedné strany tzv. nosnou a z druhé strany separační fólií. Podle druhu použitého systému pryskyčice -tvrdidlo mají prepregy při teplotě 20 °C různě dlouhou životnost. Při delším ponechání prepregu s běžným vytvrzovacím systémem na teplotě 20 °C se pryskyčice pozvolna vytvrzuje - prepreg stárne. Při stárnutí se postupně snižuje lepivost prepregu, vlastnost velice důležitá z technologického hlediska - zabráňuje vzájemnému posouvání kladených vrstev a zmenšuje se nebezpečí tvorby vzduchových polštářů mezi kladenými vrstvami.

U zastárlého a nelepivého prepregu lze kalorimetrickým měřením (obvykle metoda diferenciální dynamické kalorimetrie, “DSC”) zjistit pokles entalpie exotermického vytvrzovacího procesu. Stárnutí prepregu úměrně zpomaluje nízká teplota. Role prepregu s reaktoplastickou maticí se proto skladují v mrazicích boxech ve vodotěsných obalech při teplotách kolem -18 °C. Po vyndání z mrazicího boxu se rohože nechá v ochranném obalu vytemperovat na teplotu místnosti, aby po rozbalení nedošlo k orosení povrchu prepregu a tím i k navlhnutí matrice a povrch vláken. Ze zmrazené rohože prepregu by také nešlo odvinout potěbnou délku.

S poklesem teploty se nevytvrzená pryskyčice měkče změní až v tuhý a křehký materiál (dostane se pod svou teplotu skelného přechodu T_g podle transformačního diagramu reaktoplastu) teplota - čas (diagram TTT), oddíl Matrice,

<http://www.rta.biz/docs/Paper-SPE2003-5272-03-TTT-Composites.pdf>

Stav reaktoplastu se pohybuje od A (v tenké tekutý stav) přes B (částečně vytvrzený) do C (plně vytvrzený).

Při výrobě prepregu s termoplastickou maticí se používají tyto metody

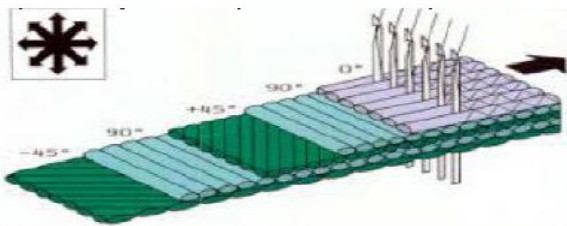
- nanášení termoplastu v roztaveném stavu (vytlačování taveniny na výtzuž)
- nanášení roztoku termoplastu na výtzuž
- nanášení vodné suspenze termoplastického prášku na výtzuž
- nanášení prášku polymeru na jednotlivá vlákna rovinně, slinování prášku (vytvoření filmu polymeru na vláknu) a optické sružení vláken.

Při použití termoplastických prepregů při výrobě dílu (kladení nebo navíjení) se musí jejich matrice natavit, aby došlo ke spojení nové a předchozí vrstvy. Lze také použít poddajnou směsí hybridní tkaninu, níž je potěbné množství vláken termoplastu (PP, PA, PET), které se po roztavení změní v souvislou matici.

Další detaily prepregu je také možné podle geometrie výtzuže:

- **jednosměrný prepreg** (angl. “unidirectional prepreg”, UD prepreg), vyrobený z rovinné tkaniny, je určen pro mechanicky namáhané díly vyráběné kladením, navíjením pásů nebo pultruzí. Má poměrně malou tloušťku (0,1-0,15 mm), dodává se v kotoučích různé šířky. Pro rychlejší získání potěbné tloušťky laminátu se vyrábí:
- **vícevrstvé prepregy**, u kterých jsou jednosměrně výtzužené vrstvy vzájemně v sobě potěbně uspořádány (obvykle pod úhly 0°, +45°, -45° a 90°, tzv. C-PLY™ laminát pod úhlem 25°) a spojeny prošívanou polyesterovou nití (obchodní značka vícevrstvého polotovaru, tvořeného jednosměrně výtzuženými vrstvami spojenými prošívanou, je Cotech® a Pyrofil®).

Schéma vícevrstvé „tkaniny“, tvořené jednosměrnými vrstvami je uvedeno na následujícím obrázku

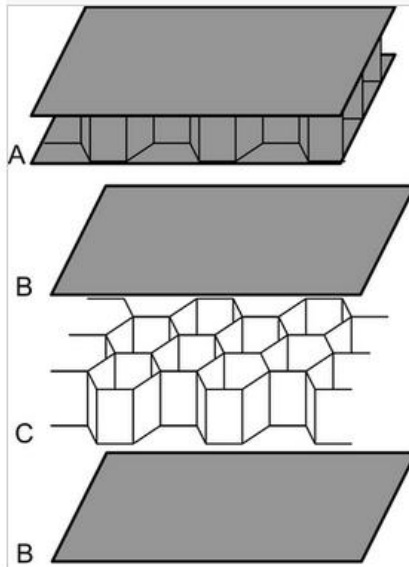


Tkaninové a rohožové prepregy lze obdržet také jako

- **kombinované prepregy**, únosnější vrstvy s tkaninovou výztuží se dávají na mechanicky více namáhanou stranu výrobku (při namáhání v ohybu na taženou stranu), vrstvy s rohožem na stranu vystavenou koroznímu prostředí (mají v tloušťce podíl pryskyice).
- **prepreg s prostorově vázanou výztuží**, kde vlákna jsou buď pletena nebo tkána.

Termín prepreg je používán i pro polotovary pro lisovací technologii SMC, které se vyrábějí s matricemi na bázi rozpouštědlových pryskyic (nenasyčené polyestery (UP) a vinyloestery (VE)) s výztuží ze sekaných skleněných vláken. Tloušťka pryskyice je zabráněna chemickou reakcí ztuhující přísady nebo krystalizační složky pryskyice (ne jejím částečným zesítním).

Zvláštním produktem, který je určen pro jádra sandwichových konstrukcí, jsou tzv. **voštiny** (angl. "honeycomb" s různou výškou, velikostí a tvarem buněk). Na dalším obrázku je ukázán nově vyvinutý (Cockrell School of Engineering, The University of Texas) druh voštiny, která odolává i opakovaným nárazům.



http://www.spacedaily.com/reports/New_honeycomb_inspired_design_delivers_superior_protection_from_impact_999.html

Voštiny jsou k potahu přilepeny a výrobci se používá fólie lepidla, kterou se voštiny překryjí před položením potahu. Při zvýšené teplotě se fólie roztaví a spojí oba prvky. Používá se jednak relativně levných Al voštin, voštin se skleněnými vlákny (skleněná rohož), voštin s neuspořádanými vlákny aromatického polyamidu rohož) značky Nomex® a Kevlar® (značka Kotex® od společnosti DuPont,) ve fenolformaldehydové pryskyici (obě složky tj. vlákna i pryskyice, zaručí voštině jeho lavost a malý vývin kouře při expozici v plameni).

Stejně jako vláknové voštiny má vzhled papíru. Starší typ nomexové voštiny byl vyroben z krátkých vláken levnějšího méně tuhého a méně pevného aromatického polyamidu polymetha-phenylenizoftalamidu Nomex® (MPIA), novější typ obsahuje kontinuální aramidová vlákna Hexcel vyrábí HexWeb®.

Oproti nomexovým voštinám mají voštiny s Kevlarem v tloušťce odolnost proti tlakovému i smykovému namáhání. Vyrábí se i voštiny s uhlíkovými vlákny a uhlíkovou matricí na oddělení posádky od prostoru, kde

m že vzniknout ohe (u letadel a vrtulník). K dispozici jsou i voštiny s k emennými vlákny.

http://www.ultracorinc.com/papers/paper_bodyhtml

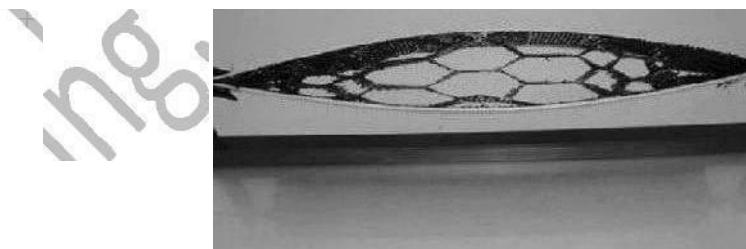
<http://www.ultracorinc.com/products/quartz->

Distan ní tkaniny se vyráb jí p edevším pro rozpoušt dlové pryskyice UP a VE. Dodávají se ve stla eném stavu, s vlákny fixovanými pojivem rozpustným v pryskyici. Po styku s rozpoušt dlem pryskyice (obvykle monomerní styren) dojde k expanzi tkaniny ve sm ru kolmém k jejímu povrchu.



Distan ní sklen ná tkanina <http://shenzhenkeba.en.made-inchina.com/productFoDJQnYxqlcM/China-3D-FiberglassWovenFabrics.html>

Vzhled jádra z expandované distan ní tkaniny je ukázán na dalším obrázku



Distan ní tkaniny jsou výrazn levn jší než voštiny umož ují snadnou výrobu tenkých profil s prom nnou tlouš kou na rozdíl od voštiny z hliníkové fólie nebo z aromatických polyamid s fenolformaldehydovou maticí, které se do pot ebného tvaru obráb jí na frézce s vysokými otá kami speciálním jednob ítým nástrojem. Pásky distan ní tkaniny se uplat ují například p i výrob navíjených nádrží pro ekologicky nebezpečné látky. Uvnit distan ní tkaniny mohou být instalována idla, která p i úniku obsahu do meziprostoru varují obsluhu

Pro odleh ení konstrukce lze pro st ední vrstvy laminátu použít také sklen é rohože typu U-PicaMat[®] nebo Unifilo[®], které p i malé plošné hmotnosti mají relativn zna nou tlouš ku.

http://www.vetrotexeuropa.com/pdf/sgvx_u700.pdf Uvedené produkty obsahují duté sklen é mikrokuliky (o prům ru okolo 10 μm). Jako jádra sendvi ových konstrukcí se používají i polymerní p ny, balza a syntaktické p ny (pryskyice s dutými mikrokulí kami), nyní se vyráb jí sendvi ové panely Tycor[®].

Tkaniny a rohože lze vyráb t ze všech typ kontinuálních vláken. Výjimkou jsou borová a SiC vlákna získaná metodou CVD, tj. depozicí par na wolframové nebo uhlíkové vlákno. Tato vlákna jsou pro svou tlouš ku málo ohebná a jejich vysoká tuhost je nejlépe využita p i například v namáhaných vláknech.

Od vyztužujících vláken jsou vedle vysoké pevnosti a tuhosti očekávány tyto další vlastnosti:

- malý rozptyl mechanických vlastností jednotlivých vláken (malé rozdíly pr ez)
- stabilní mechanické vlastnosti během dalšího zpracování

Kvalita vláken závisí jak na složení a čistot výchozích surovin a na struktu e vláken. Stabilní mechanické vlastnosti během dalšího zpracování vláken zajiš ují ochranné povrchové povlaky (tzv. "sizing"), které je nutno aplikovat na jednotlivá (elementární) vlákna ještě p ed jejich spojením do pramenu.

Prům r k ehkých vláken je závislý na dalším zpracování. Pro tkaniny, kdy p i tkaní jsou vlákna ohybána, jsou vhodná pouze vlákna menšího prům ru, protože existuje minimální polom r_{min}, po jehož překro ení vlákna praskají. Pouze na polymerních vláknech lze ud lat uzel a zatáhnout ho bez porušení vlákna. Následující tabulka ukazuje minimální polom r ohybu r_{zných} k ehkých vláken.

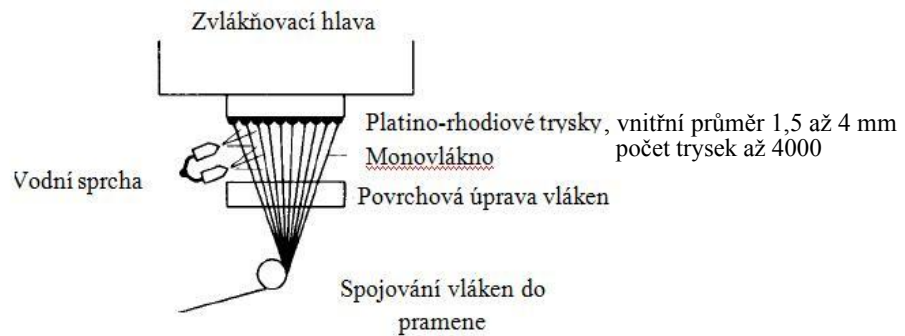
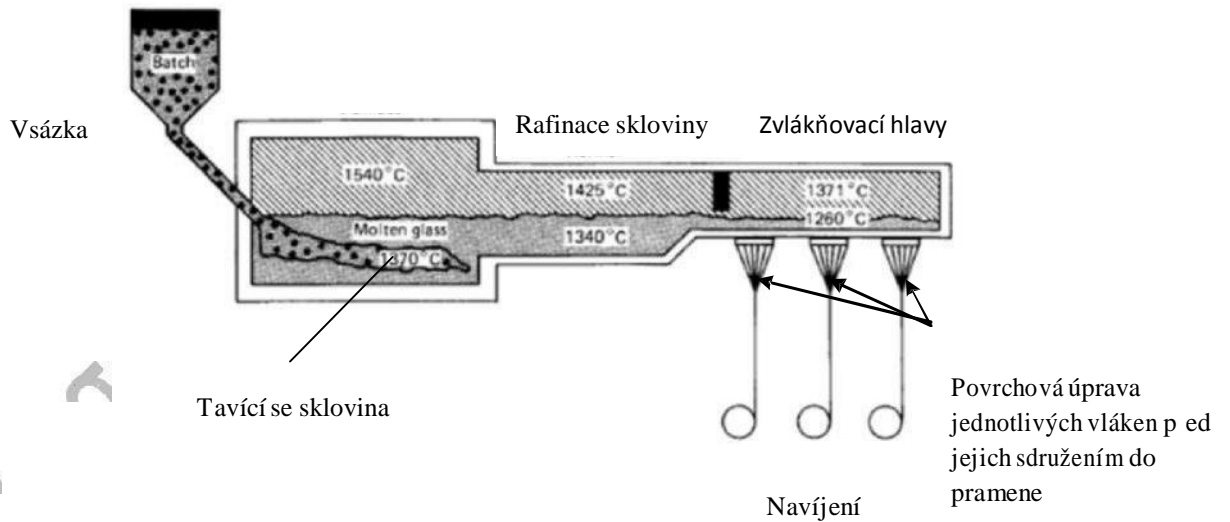
Vlákno	Prům r vlákna [μm]	Modul E [GPa]	r _{min} [mm]
uhlíkové	11	520	1
Al ₂ O ₃ FP [®]	25	345	3
SiC	9	300	0,5
B, SiC (CVD metoda)	200	400	14

SKLENĚNÁ VLÁKNA

<http://www.britglass.org.uk/AboutGlass/TypesofGlass.html>
<http://www.sgva.com/>
<http://manufacturing-fabricatinglobalspec.com/Industrial-Direcovr/s2glasscomposite.html>

Složení

Skleněná vlákna mají silikátový základ (SiO_2). Vyrábí se tažením taveniny směsí oxidů Si (s přímími oxidy Al, Ca, Mg, Pb a B) a v tštinou s malým podílem alkalických kovů Na a K. Poté je dle potřeby v dnu zvláknovací hlavy se dosáhne prodloužením proudu skla tekoucího platinorhodiiovými tryskami (průměr trysky je 1 mm) ve dnu zvláknovací hlavy. Konečný průměr vlákna je dán rozdílem mezi rychlostí vytékání skloviny a rychlostí odtahování vlákna. Jednotlivá vlákna se po povrchové úpravě sdružují do pramene a navíjejí se na cívku. Sdružením pramenů vzniká roving (prameneček). Schéma výroby skleněných vláken je na následujícím obrázku.



Složení sklovin (hmotnostní procenta) uvádí následující tabulka.

<http://www.asminternational.org/content/ASM/StoreFiles/06781Gp27-34.pdf>

Účinná složka	A sklo	C sklo	D sklo	E sklo	ECR sklo	AR sklo	S-1 HM sklo	R sklo	S-2 sklo	S-3 UHM sklo	L sklo	L™ sklo	S-Q	Křemen sklo	Qfiber	Tepluvzdorné sklo
SiO ₂	63 až 72	64 až 68	72 až 75	52 až 56	54 až 61	55 až 69	65	55 až 60	55 až 65		6,2 až 9		95 a více	99,999	99,5	
Al ₂ O ₃	1 až 6	1 až 5	0 až 4	0 až 1	11,2	1 až 5	25 až 27	24 až 25			2,6					<0,05
TiO ₂	2 až 6			0 až 1,5		0 až 4										<0,01
B ₂ O ₃			0				0	0	0	0				0	0	
CaO	4 až 10	11 až 15	0 až 1	17 až 25	5	1 až 15		14 až 17	9 až 0,2							<0,02
MgO	1 až 4	2 až 40		0 až 2			10	6 až 7	4 až 7		19,3					<0,02
Na ₂ O																
K ₂ O	0,3	3	2	0,3	0,5					0,1						
Fe ₂ O ₃	0 až 0,8	0 až 0,8	0 až 0,5	0 až 0,3	0 až 0,8	0,2				0 až 0,05	0 až 0,3					<0,02
PbO											2,5 až 28					
TeO ₂																10
Teplota měkčení [°C]			1500	915	830 až 860	1159			1560				1690			

• Sklo bez oxidu boru

A sklo je určeno pro architekturu a jako běžné lahvé sklo

Vlákna ze skloviny C s vyšším podílem alkálií, mají nižší teplotu měkčení, jsou méně pevná a jejich mechanické vlastnosti rychleji klesají s rostoucí teplotou. V prostředí obsahujícím kyseliny v těsném podílu alkalických prvků zlepšuje odolnost proti rozpouštění, v samotné vodě se však alkalické prvky rychle vyluhují.

D sklo je určeno pro elektrická zařízení. Jedná se o vlákna dielektrická, s malými hodnotami relativní permittivity a malým ztrátovým koeficientem

<http://www.sinomatech.com/2009/tezhongxianwei/zxw-rodetail-php?Id=257&pid=35>

Vlákna ze skloviny E (tzv. bezalkalické vápenato-hliníkové sklo, sklo Eutal, má eutektické složení s nejmenší teplotou tavení, je nejlépe zpracovatelné (od 1,6 do 3,15 \$/kg) a poskytuje dobré mechanické a elektrické vlastnosti (nevodivost, velký povrchový odpor, relativně malou relativní permittivitu (dříve dielektrická konstanta) při malých dielektrických ztrátách (relativní permittivita se pohybuje mezi 5,9 až 6,4 a ztrátový koeficient (tangens ztrátového úhlu) při frekvenci 1 MHz je 0,0039) a poskytuje dobrou odolnost proti hydrolýze (rozkladu v horké vodě). Chemicky odolnější E skla jsou bez oxidu boru (B₂O₃).

Vlákna ze skloviny E-CR, korozivzdorné sklo bez oxidu boru, obchodní značka Advantex, vyráběné společností Owens Corning. Jde o vícesložkové fázové diagramem (SiO₂-Al₂O₃-CaO-MgO). Má v těsné hustotu, v těsné modul pružnosti, v těsné teplotu měkčení, v těsné teplotu měkčení, v těsné odolnost v kyselině prostředí a horší relativní permittivitu než běžné E sklo.

Vlákna ze skloviny AR jsou vhodná pro alkalické prostředí. Sklovina je odolná v prostředí i tomuto prostředí (používají se například pro výrobu střešních šablon s cementovým pojivem, tzv. „ekologický“ eternit). Pokud nejsou vlákna k dispozici, vyhovuje i E sklo.

Vlákna ze skloviny S mají v těsné podílu oxidu křemíku a hliníku a jsou dražší (jejich cena se pohybuje od 19 do 31,6 \$/kg), protože sklovina má v těsné teplotu tavení. Používají se v těsné v kompozitech s epoxidovou maticí. Vlákna mají v těsné pevnost v tahu a v těsné modul pružnosti v tahu než standardní vlákna z E skla. Jsou bez oxidu boru (B₂O₃).

Vlákna ze skloviny S-1 mají velkou pevnost, neobsahují B₂O₃.

Vlákna ze skloviny R mají velkou pevnost, neobsahují B₂O₃. Mají menší modul pružnosti než vlákna S.

Vlákna ze skloviny S-1 HM™ mají v těsné modul pružnosti než vlákna S-2. Neobsahují B₂O₃.

Vlákna ze skloviny S-2 Neobsahují B₂O₃. Pod obchodním názvem ZenTron® a VeTron® je vyráběné společností AGY. (Společnost AGY také vyrábí ultrajemná sklenářská vlákna BC2250 a BC3000 pro těsné elektrické obvody, které potom mohou mít v těsné hustotu spoj). <http://www.agy.com/products/index.htm>

Vlákna ze skloviny S-3 UHM s velkým modulem pružnosti v tahu (nový výrobek společnosti AGY), Neobsahují oxid boru. Sklo je vhodné i pro medicínské aplikace. Vlákna nazývaná PBH se používají pro implantáty s termoplasty PEEK, PEI a PPS.

Vlákna ze skloviny L obsahují oxid olova. Olovo především zvyšuje nepropustnost vyrobeného laminátu pro rentgenové záření. Aplikace tohoto typu skla najdeme v lékařství a v deskách přístrojích.

<http://www.radiationproducts.com/leaded-glass.htm>

NDT sklo – nové sklo společnosti Corning se jmenuje Gorilla® Glass 3 NDT™. Je odolné proti poškrábání, takže se hodí pro dotykové obrazovky (mobilní telefony, tablety, ultrabooky a notebooky) a na elní automobilová okna (NDR, “Native Damage Resistance”). Sklo je připraveno chemickou temperací, jeho odolnost vyplývá z existence tlakového pnutí na povrchu. Vlákna se z něho nevyrábějí.

Dutá sklenářská vlákna z H-skla mají menší hustotu než plná vlákna a mají proto velkou měrnou pevnost (N/tex). Jsou elastická a pevná v tlaku, mají dobrou elektrickou, tepelnou a akustickou izolaci schopnost a v nichž kompozitech se uplatní i jejich dobrá schopnost tlumit energetické rázy (kryty radaru a antény letadel). Jsou použita i v laminátu lyží Head, jejichž výrobce uvádí, že jde o nejlepší lyže na trhu právě díky použití dutých sklenářských vláken (název dutých vláken je “Aircoat®”)

<http://www.head.com/ski/technologies/skis/?region=eu&id=313>

L-Glass™ je nové sklo pro vysokofrekvenční těsné elektrické obvody a pro radomy letadel (toto sklo má malou relativní permittivitu a malý ztrátový koeficient oproti E sklu). Vyráběné společností AGY.

<http://www.agy.com/products/index.htm> Složení skloviny nebylo možno stanovit.

K emenná vlákna mají stejn nízkou relativní permitivitu jako polymerní aramidová vlákna, ale oproti nim mají o dva řády menší ztrátový koeficient při vysokých frekvencích proudu, velmi malý součinitel délkové teplotní roztažnosti (vydrží teplotní šoky), má nulovou adsorpci vlhkosti a dobrou prostupnost pro UV paprsky světelného záření. K emenné sklo m kene již při 1300°C, ale při v tších teplotách se nestává kapalným. Společnost JPS Composite Materials Corp. vyrábí Astroquartz®, Astroquartz® II, Astroquartz® III, společnost Sain-Gobain dodává Quartzel®.

<http://www.quartz.saint-gobain.com/quartzel-products.aspx>

<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=9c2b0689a6f04200b54d1610961e02b9&ckc=k>

http://jpsglass.com/jps_databook.pdf

Výroba k emenných vláken spoívá v rozeletí stejného krystalického k emene a jeho roztavení (teplota tání 1600-1725 °C).

Vlákna S-Q tvoří p echod mezi k emennými a ostatními sklen ými vlákny. Obsahují 95 a více %SiO₂

Q-Fiber™ je k emenná vata pro tepelné izolace a filtraci.

http://www.jm.com/engineered_products/filtration/products/qfiber.pdf

Tellurové sklo (chalkogenidové sklo) má velkou refrakci (velký absolutní index lomu světla) a je schopno p enášet infra červené paprsky (optoelektronické prostředky pro no ní vid ní, „noktovisory“). Je vhodné pro optická vlákna a laserovou techniku. Další prvky v chalkogenidových sklech jsou Se, Ge, As, Sb, S, I a Ga.

K emenné vlákno o průměru 9 μm stojí cca 220 \$/kg, vlákna v tšího průměru jsou levnější (při průměru 14 μm 130 \$/kg). Vedle tkanin a rohoží pro tepelné izolace se k emenná vlákna používají pro kryty radar letadel, desky plošných spoj mobilních telefonů a počítačů (s kyanosterovými pryskyřicemi) a pro vojenské letouny. K dispozici jsou také voštiny s k emennými vlákny („quartz honeycomb“). Užití těchto voštín v krytech radarů zaručuje výbornou prostupnost elektromagnetických vln (velká radiopropustnost).

<http://www.Ultracorc.com/wp-content/uploads/2010/03/Paper5.pdf>

O mikrostrukturu sklen ých vláken je velmi málo poznatků vzhledem k jejich amorfnímu stavu, který je způsoben nepatrnou krystalizací směsí oxidu křemíku a ochlazování taveniny. Předpokládá se, že na vysoké pevnosti sklen ých vláken, vedle velikostního faktoru (malý povrch a malé defekty v tenkém vlákně), se podílí také odlišná struktura jádra a povrchových vrstev. Zatímco jádro obsahuje nahodile orientovanou síť kovalentně vázaných atomů, povrch má pravděpodobně semi-orientovanou strukturu. Na povrchu tak vzniká vysoké tlakové napětí v podélném směru, které zabraňuje snadnému rozvoji trhlin při tahovém zatížení vlákna. Podobný mechanismus je v souladu se skutečností, že jakékoliv narušení povrchových vrstev (např. mechanické poškrábání) vede k drastickému poklesu tahové pevnosti vlákna. Předpokládána tenká povrchová vrstva s preferovanou orientací kovalentních vazeb se však neprojevuje měřitelnou anizotropií elastických veličin skleného vlákna. Při mikromechanických výpočtech se uvažují stejné veliké hodnoty modulu pružnosti E a Poissonova poměru ν ve směru podélném i příčném.

Vlastnosti sklen ých vláken při 20°C

	Sklo C	Sklo D	Sklo E	Sklo E-CR	Sklo AR	Sklo S	Sklo S1HM	Sklo R	Sklo S-2	Sklo S-3 UHM	Sklo L	Sklo H	Sklo L™	Křemenné sklo	Sklo S-Q	Telurové sklo
Průměr [μm]	9 až 13		5 až 16			9 až 11			3 až 25			10-13 Vnitřní Ø 5-6		9,14		
Hustota [g/cm ³]	2,49	2,14	2,14	2,62	2,7	2,49		2,33	2,46	2,82	4,3	1,4	2,3	2,19		4
Modul pružnosti v tahu [GPa]	69	55	73	81 až 81	75	83 až 91	90	36	85,6	99	51,1		62	72		20
Pevnost v tahu [GPa]	až 3	2,6	0,65 až 1,3	2-2,2	1,7	0,43 až 0,459	3,07	2,93	4,9	3,23 až 3,333	1,6			3		
Prodloužení při přetáčení [%]	4,8		1,8-3,2			5,7			5,7					3		
Součinitel teplotní roztažnosti [10 ⁻⁶ 1/K]	7,2	3	4,9	6	9	3,5		4	1,6				3,9	0,5		13
Součinitel teplotní vodivosti [W/mK]	1	0,8	1		1,1	1		10	1,45			0,21		1,4		
Teplota měkčení [°C]	730	886	300	816		970		386	1056	1056				1100		
Relativní permitivita při 1 MHz	4	6,8	7,2	7,2	5 až 5,4				5,2		2,9		4,86 při 10 GHz	3,75		
Ztrátový koeficient při 10 GHz		0,0026	0,006		0,007			0,0019	0,002			0,01	0,005	0,0002		

U hodnot vlastností sklen ých vláken p evzatých z různých publikací není obvykle uvedeno, při jakém průměru vláken byly naměřeny. Je však známo, že čím mají vlákna menší průměr, tím jsou pevnější. Při průměrech 3 až 4 μm obdržíme kompozity s větší pevností v tahu, než při použití vláken běžných průměrů. Na laminátech vyztužených sklen ými tkaninami z tenkých vláken bylo zjištěno, že se zvýšil i modul pružnosti. S vlákny velkých průměrů (60 a více μm) mají kompozity v tší pevnost v tlaku podobnou ve směru vláken. Rozdíly dosahují řádů desítky MPa. Z technologických důvodů jsou nejběžnější průměry od 7 do 15 μm (roving z vláken malých průměrů se totiž h oteple prosycuje pryskyřicí).

Povrch sklen ých vláken je hydrofilní. Oxidy SiO₂ a Al₂O₃ vytvářejí hydroxylové skupiny (-M-OH, kde M je buď Si nebo Al), ke kterým jsou molekuly vody vázány vodíkovými můstky. Na povrchu vláken a v jeho mikroskopických trhlínkách je při 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 % adsorbováno asi 0,1 % hmotnostních vody. Adsorpce vlhkosti na povrchu vyrobených vláken je velmi rychlá (rychlost navlhání je možno demonstrovat například vážením vyřihaných sklen ých vláken na analytických vahách, vlákna rychle zvlhají svou hmotností). Adsorbovaná vlhkost přispívá k povrchovým defektům vláken jako tenzoaktivní látka, snižující lomovou energii skla. Pevnost vyrobeného vlákna je proto v tší než pevnost vlákna s rovnovážným obsahem vody daným vlhkostí okolní atmosféry. Vysoký podíl adsorbované vody je překážkou vytvoření dobré vazby mezi vláknem a polymerní maticí. Proto je nutno výrobky ze sklen ých vláken chránit před vzdušnou vlhkostí polyethylenovými obaly a navlhlá vlákna se musí před použitím vysušet. Vysušování v horkovzdušné sušárně se u sklen ých vláken (a výrobků z nich) doporučuje i tehdy, když jsou skladovány v relativně suchém prostředí.

Úprava povrchu sklených vláken

Při manipulaci s nechráněnými vlákny dochází při jejich vzájemném kontaktu k abrazi a následnému snížení pevnosti. Proto se každé jednotlivé vlákno ihned po vytažení z trysky ve dnu zvlákovácí hlavy, vydloužení a ochlazení na teplotu okolí pokrývá ochranným povlakem (tzv. "sizing"), jehož tloušťka odpovídá hmotnostnímu podílu 0,3 až 1,5 %. Jsou používány: <http://www.gelest.com/goods/pdf/couplingagents.pdf>

- **lubrikační látky** (vosk, olej, škrob, želatina, polyvinylalkohol), které usnadní další textilní zpracování vláken. Lubrikační látku je nutno před výrobou kompozitu z povrchu vláken odstranit, aby bylo dosaženo potřebné soudržnosti vláken a matrice.

- **vazebné prostředky**, které mají dobrou afinitu jak ke skleným vláknům, tak k polymerní matici

K pozitivním účinkům ochranných prostředků patří snížení adsorbovaného podílu vody (mají určitý hydrofobizující účinek) a antistatické působení (vlákna méně přitahují prach). Běžné vazebné prostředky pro silikátová skla jsou **organokřovové sloučeniny** (hlavně „chromkomplexy“, nejznámější je Volan® společnosti DuPont) a **organosilany** (zkráceně silany). Chemická struktura silanů je komplikovaná, stejně jako mechanismus jejich působení před spojením s polymerem a sklem. Vazebné prostředky nanášené ve vodném roztoku nevytvářejí na povrchu vláken souvislý film, ale jsou přítomny v podobě mikroskopických kapek ulpívajících na sklu v místech s vyšším podílem reaktivních skupin (povrch skla má poněkud jiné složení než jádro). Již z tohoto důvodu nezabraňuje silany (přes určitou hydrofobní vlastnost vnějších vrstev povlaku) působení vody na povrch vláken, spíše jenom znesnadňuje difúzi molekul vody do kompozitu difúzi vody podél vláken. Molekuly vody které k vláknům difundují skrz polymerní matici, znovu hydrolyzují vazbu vazebného prostředku k povrchu skla. A koliv jde o reverzibilní proces, tj. po vysušení se kovalentní vazby opět obnoví, u mechanicky zatížených kompozitů tato hydrolyza umožňuje smykové posuvy vláken v matici, zvyšování množství adsorbované vody a nakonec může dojít k úplnému porušení rozhraní vláken a matrice. U laminátů se sklenou výztuží se takové porušení projevuje zlením poškozeného místa.

V praxi jsou používané úpravy rozlišovány podle tvrdosti:

- **měkčí** úprava
- **polotvrdá** úprava
- **tvrdá** úprava

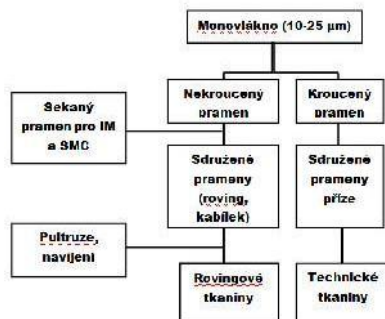
Tvrdost vazebného prostředku, daná jeho chemickou strukturou, určuje vhodnost rovingu pro další technologie. Tvrdá úprava, například methakrylsilanem nebo chromkomplexem (je používán termín „**tvrdý roving**“) zaručuje dobrou sekatelnost rovingu a rovnoměrný rozpad vláken při sekání, tj. vlastnosti potřebné při výrobě dílů pomocí stříkacího zařízení nebo při přípravě prepregu pro lisovací technologii (SMC). Je vhodná i při výrobě jednosměrných prepregů a rohoží. Měkčí úprava (tzv. **měkčí roving**) provedená například vinylsilanem nebo aminosilanem zajišťuje rychlou směšivost vláken polyesterovou pryskyčicí a používá se u rovingů pro navíjení, tažení profilů a pro tkaniny určené k výrobě tenkých dílů. Jsou používány povlaky aminosilanu, silanoesteru, vinylsilanu, sírové silany, polyuretanové (isokyanátové) silany a monoaminové silany (1-[3-(trietoxysilyl)propyl]urea).

U dražších skel, používaných pro kompozity s epoxidovými maticemi, se užívá jiná úprava. Společnost Owens Corning opatřuje vlákna povlakem na bázi epoxidové pryskyčice (epoxidový silan). Zvláštní povrchovou úpravou vyžadují sklená vlákna do fenolformaldehydových pryskyčic. Místo běžných silanů se používají pouze povlaky na epoxidové bázi. Ochranný povlak PA845 založený na polyimidu se vyznačuje velkou tepelnou stabilitou a je nutné jej použít s pryskyčicemi vyžadujícími vytvrzení při vysokých teplotách.

<http://www.compositesworld.com/products/new-fiber-sizing-formulation>

Výrobky ze sklených vláken

Blokové schéma výrobků ze sklených vláken je uvedeno v následujícím obrázku.

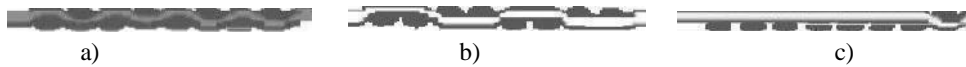


Oznaování vláken Saint-Gobain Adfors.cz s.r.o. v Litomyšli <http://www.vertex.cz/> je provedeno pomocí znaků T61C, T61, 876, T86, 30, TD37C/TD37SC. Kromě průměru vlákna je uvedena jemnost vlákna (lineární hustota v tex) a typ cívků.

Povrchová úprava vláken je opatřena značením T67, T61, T8, T30, TD37, TD52, T18 s krátkým popisem typu. Výrobci v USA značí průměry vláken písmeny (od AA=0,8-1,2 µm do U=25,4 µm). Roving se nejčastěji vyrábí z vláken E (7µm), G (9µm), H (10µm) a K(13µm) a je dostupný v různých jemnostech. Počet elementárních vláken v jednom prameni je obvykle 204 a násobky 204 (výchozí hodnota je dána počtem otvorů ve dnu zvlákovácí hlavy), jemnost pramenů tvořících roving se pohybuje od 34 do 210 tex, počet pramenů v rovingu od 5 do 60, takže výsledná jemnost rovingu je 92 až 9600 tex.

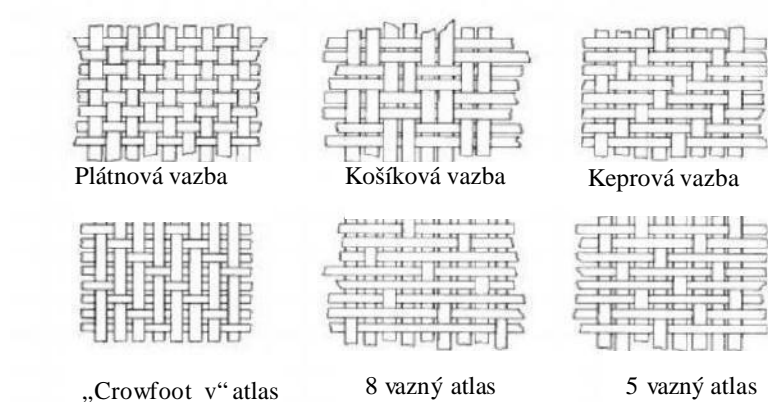
Rovingové tkaniny mají rovnou textilní vazbu. Vedle požadavků na tuhost a pevnost kompozitu o vhodné vazby rozhoduje i tvarová lenitost forem. Vzájemné uspořádání osnovy a útku vytváří základní typy vazeb:

- **plátňová** vazba (angl. “plain”) je nejpevnější a také nejméně poddajná při tvarování, když rovinky v osnově i útku jsou stejně silné a stejnoměrně vzdálené. Pramen útku prochází vždy pod a nad každým pramenem osnovy (tzv. vyvážená plátňová vazba). Volnější a tím i poddajnější plátňovou vazbu vytvářejí dva a více pramenů útku, procházejícího pod dvěma nebo více nitmi osnovy (košíková vazba, angl. “basket”).
- **keprová** vazba (angl. “twill”) je vytvořena, když útek překříží minimálně dva prameny osnovy, než opět projde pod jedním nebo více prameny osnovy. V dalším se útek posouvá doprava nebo doleva vždy k nejbližšímu prameni osnovy. Na tkanině je tak vytvářen diagonální vzor. Pokud je použita vazba například 3/1, znamená to, že jeden pramen osnovy je překryt dvěma prameny útku a jedním pramenem útku na spodní straně. Keprových vazeb je více typů. Tkanina s keprovou vazbou je ohebnější než plátňová vazba, ovšem pouze při některých povrchových úpravách vláken.
- **atlasová** vazba (angl. “satin”) je nejméně pevnou textilní vazbou. Jeden pramen osnovy je překryt dvěma a více prameny útku svrchu a jedním pramenem ze spodní strany. Počet pramenů osnovy překrytých útkem udává tzv. vaznost atlasu (5 až 12). Povrch tkaniny je hladký a lesklý, s dlouhými ploškami, v nichž vlákna leží rovnoběžně s povrchem. Vazba umožňuje dosáhnout velkého objemového podílu vláken ve vrstvě kompozitu a zároveň umožňuje minimální zvlnění vláken. S atlasovou tkaninou je tedy možno získat kompozit s větší pevností a tuhostí, než při použití ostatních vazeb.

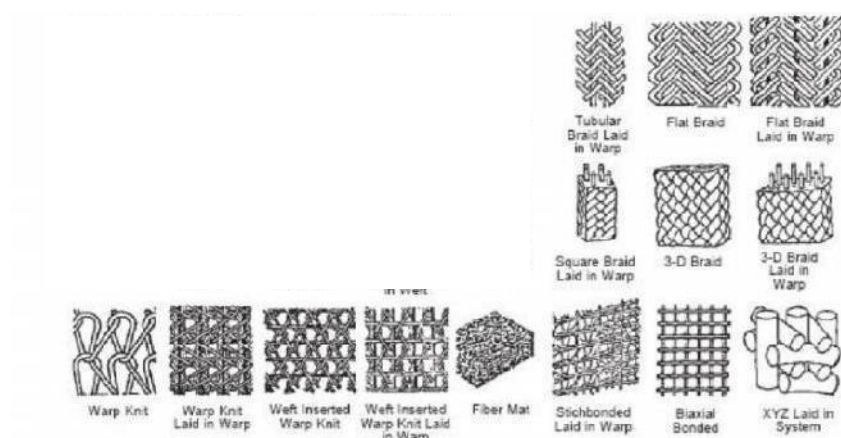


Druhy tkanin v bočním pohledu: a) plátno, b) kepr, c) atlas

Atlasová tkanina, je-li použito mkké povrchové úpravy vláken, je dobře tvarovatelná (splývavá). Druhy textilních vazeb jsou uvedeny v následujícím obrázku.



Kromě tkanin se používají také pleteniny (anglicky “knit”-hákování a “braid”-pletení). Tyto technologiemi je možno dosáhnout i prostorové vazby vláken.



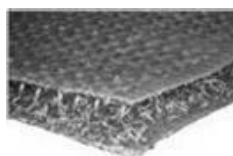
Rotačním pletením je možné připravit výztuž pro kompozit, která má roviny pleteniny vzájemně svázané v 3-D (prostorovém) uspořádání.

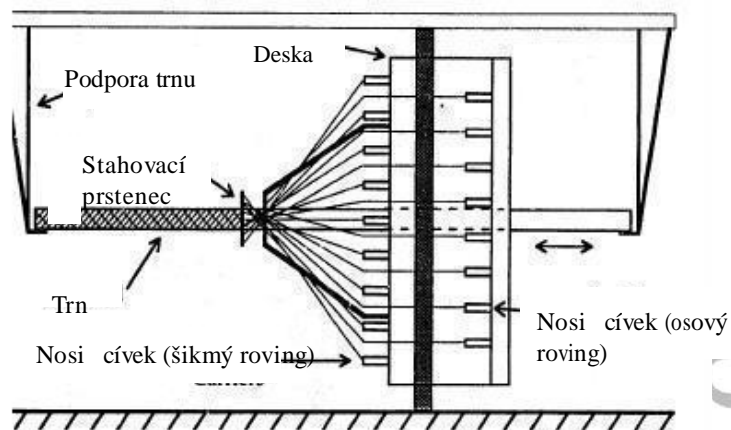
Cívky s rovingy jsou uloženy na rohatkách, které jsou vybaveny spojkou a brzdou, což dovolu je p erušovaný otáivý a translační pohyb cívek. Moderní stroje pro pletení mají v tšinou horizontální uspořádání.

<http://www.mechnorthwestern.edu/fac/cao/nsfworkshop/briefs/LangerPickett.pdf>

Na obrázku je pletený 3-D polotovár pro technologii RTM, který urychlu je ukládání vrstev

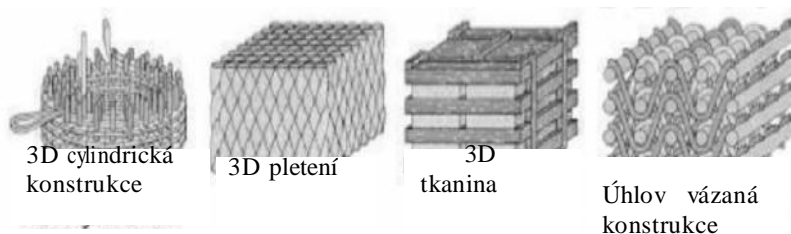
<http://www.compositesworld.com/articles/rapid-layup-new-3-d-preform-technology> (vyslovuj „priform“)



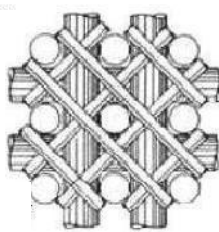


Pro dobré výrobky je nezbytné pro pletení použít CAE s příslušným softwarem, který optimalizuje pohyb cívek, vizualizuje schéma pletení a analyzuje mechanickou pevnost výrobku.

Princip prostorové vazby vláken je ukázán na následujícím obrázku.



Pokud je konstrukce dále vázána, může vzniknout prostorová vazba, kterou ukazuje následující obrázek



Ing.

Pokud je u plošné tkaniny ve směru útku použito menšího průměru pramene než v osnově a navíc jsou prameny jemnější, dostáváme nevyváženou tkaninu, vhodnou pro výztuž dílů, které nemusí mít stejnou pevnost ve směrech osnovy i útku. Extrémním případem jsou jednosměrné tkaniny, které mají paralelně uspořádané roviny útkem, tvořeným jemným pramenem s malou lineární hustotou (délkovou hustotou).

Tkaninu charakterizuje plošná hmotnost (tzv. "gramáž", plošná hmotnost tkanin se pohybuje obvykle v rozmezí 140 až 800 g/m²). Těžké tkaniny umožňují rychlé získání v tloušťce (laminátu), tloušťka, dostava (tj. podíl průměru pramene nebo druzných pramenů v osnově k průměru útku na 1 cm), druh pramene nebo průměru pro osnovu a útek, šířka role (cm) a délka tkaniny v roli (m).

Tkaniny z průměru mají podle průměru zákrut, průměru průměru a použité povrchové úpravy různou ohebnost. Jsou určeny pro výrobu elektroizolací laminátů, jako filtrační, dekorativní tkaniny geotextilie, jako nosné vložky pro asfaltové izolace a jako výztuž pro méně namáhané lamináty.

Před použitím tkanin s lubrikovanými vlákny pro mechanicky namáhané lamináty je nutná tepelná (vypálení), chemická (rozpouštění) nebo kombinovaná úprava, aby lubrikace byla odstraněna. Je-li tkanina opatřena vazebným prostředkem, ten se z tkaniny neodstraní.

Používá se také tkanina z objemované průměru, vyrobené kontrolovaným rozrušením povrchových vrstev vláken průměru pomocí proudu tlakového vzduchu. Tkanina se potom snadno prosycuje pryskyřicí. Existují i kombinované tkaniny, u nichž je osnova z jednoduché průměru a útek z objemované průměru.

Pramenové skleněné rohože jsou obvykle vyrobeny ze sekaných vláken, tj. pramenů sekaných na vlně délky (obvykle 25 až 50 mm) nebo vláken kontinuálních. Vlákna jsou v rohoži spojena buď emulzním pojivem nebo speciálními pojivy rychle rozpustnými v pryskyřici (pojivo na bázi práškových polyesterů zaručuje transparentnost laminátu při použití matrice z nenasyčených polyesterů). Pro lisování může být pojivo pomalu rozpustné, pro kontaktní laminování, pro infuzní a injektážní technologie (metody SCRIMP, VIP, VARIM, RIM, RRM, SRIM, RTM, CAPRI a VAP) je žádoucí malá viskozita.

Výrobci polotovárů z vláken dodávají také kombinované výrobky

- tkaniny kombinované s rohožením (vícevrstvé tkaniny)
- jednosměrné tkaniny (útek těchto tkanin obsahuje výrazně méně vláken než osnova)
- jednosměrné tkaniny s výztuží orientovanou v i podélné ose úzkého pásu pod úhlem 45° nebo ± 45° (vícevrstvé tkaniny) nebo pod úhlem 25° (C-PLY technologie)
- vícevrstvé polotovary umožňují velmi produktivní výrobu laminátů (získá se rychleji potěbná tloušťka laminátu) s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi

Kód vrstvení u vícevrstvých jednosměrných tkanin je analogický kódu vrstvení laminátů. Například [+45/90/-45/0] s kvalitou 225/225/225/420 znamená čtyřvrstvý produkt s celkovou plošnou hmotností 1095 g/m² o tloušťce 0,96 mm, v němž jednotlivé orientované vrstvy jsou spolu vázány prošitím tenkým pramenem (dříve se používalo vazby pomocí termoplastického prášku, který se v pryskyřici rozpustil). Výhodou spojení vrstev prošitím je lepší tvarovatelnost vícevrstvého polotovaru, rychlejší směrní vláken a nepřítomnost zbýtků termoplastu na povrchu vláken. Při skladování hromadného použití vícevrstvých polotovárů je například výroba hřídel a listů vrtulí v trných elektrárnách navíjením (jde o díly namáhané v krutu, u nichž je žádoucí vrstvením ± 45° dosáhnout vysoké torzní tuhosti, finská firma Ahlström dodává tzv. "narrow tapes"). Pásky dvouvrstvé tkaniny mají orientaci vláken ±45°, jsou navíjeny pod malým úhlem. Úzké vícevrstvé pásy s roviny ze skleněných vláken, které mají okraje zpevněnou textilní vazbou, jsou používány nejen při navíjení, ale také k dokončení spojovacího dílu.

Skleněná vlákna lze v tkaninách kombinovat i s jinými druhy vyztužujících vláken. Zvláště u tkanin z dražších, například aramidových nebo uhlíkových vláken, lze vlákna ve směru menšího namáhání nahradit levnějšími skleněnými vláknovznikají **hybridní tkaniny**. Zkombinují-li se skleněná vlákna s termoplastickými vlákny vzniká směsná tkanina, která je vlastně prepregem, obsahujícím termoplastickou matici v podobě vláken.

Existuje také skleněný roving, opatřený práškovým povlakem polyamidu 12 (společnost EMS, Švýcarsko), který je určen pro navíjení na speciálních navíjecích strojích (před navínutím je zapotřebí polyamid roztavit, například laserem). Pramenový prepreg (s reaktivní pryskyřicí ve stavu B) umožňuje navíjením zhotovit díly s konkrétními povrchy (například pro výrobu sacího kanálu stíhačky F-22 byl použit pramenový prepreg s uhlíkovými vlákny a epoxidovou pryskyřicí (viz oddíl Technologie).

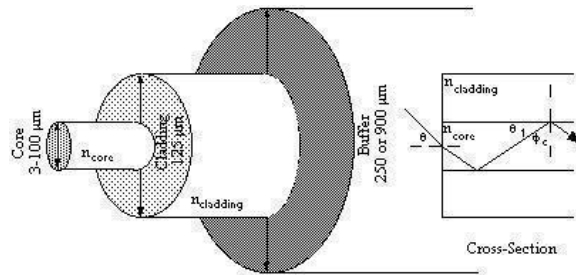
Prokládáním vrstev s výztuží z uhlíkových vláken vrstvami s aramidovou tkaninou dostaneme **hybridní laminát**, který při vlně tuhosti, než má samotný aramidový kompozit, dosahuje i velké odolnosti proti prázku. Je možno také kombinovat uhlíková a aramidová vlákna v jedné tkanině.

Skleněná optická vlákna

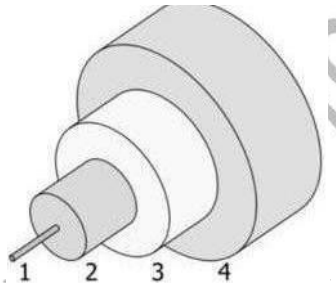
http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber

Skleněná optická vlákna především nahrazují měděné vodiče pro komunikaci úlevy (optoelektronika). Použití mají ale daleko širší. Optická vlákna mohou působit:

- jako **přenašeče** elektrického signálu je přeměnou pomocí světelných diod (LED) nebo polovodičových injekčních diod (ILD, "Injection-Laser Diode") na světelné pulsy. Tyto pulsy jsou přeneseny do optického vlákna, kterým se dále šíří. Z vlákna nemohou uniknout vzhledem k totální reflexi, znázorněné na obrázku struktury vlákna.
- jako **senzory**



Z obrázku je vidět, že stavba skleného optického vodiče obsahuje vrstvu s menším indexem lomu světla ("Cladding"), než má vlastní optické vlákno. Optická vlákna pro kabely mají stavbu tvořenou více vrstvami, jak ukazuje následující obrázek:

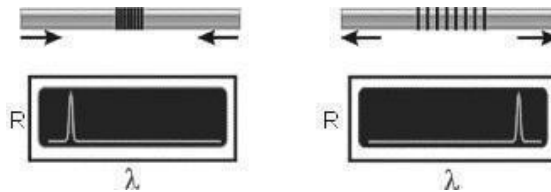


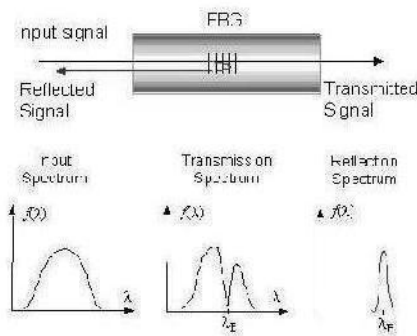
Jádro ("Core") je tvořeno sklovinou SiO_2 s přísadovými prvky (tellur, germanium). Vrstva skla s menším indexem lomu než má jádro ("Cladding") odráží odchýlené paprsky (je tvořena pouze sklovinou SiO_2 (může být též polymerní)). Další vrstva ("Buffer") chrání obě skloviny, funguje jako nárazník. Poslední vrstva ("Jacket") je z vláken (které při větší zátěži při kladení kabelu, obvykle z pevných polymerních vláken, například Kevlaru AP) v polymerní matici z bezhalogenových polymerů (PVC, PE, PU) http://en.wikipedia.org/wiki/Low_smoke_zero_halogen. Polymerní vrstva chrání kabel před abrazí a před působením nepříznivých vlivů (fotodegradace UV zářením, působení olejů a rozpouštědel atd.).

Jednoduchá optická sklená vlákna jsou nyní nahražována mikrostrukturovanými optickými vlákny (MOF), zvláště těmi, které obsahují periodicky uspořádané podélné kanálky (fotonická vlákna). http://en.wikipedia.org/wiki/Photonic_crystal_fiber

Sklená optická vlákna jako senzory („chytrá“ optická vlákna, “Smart Fibres”)

Sklená optická vlákna mohou fungovat též jako snímače teploty a deformace (a tedy i napětí) a mohou sloužit k průběžnému monitorování konstrukcí. K tomuto účelu se používají speciálních FBG vláken ("Fiber Bragg Grating"), která mají na svém povrchu oblasti s ryskami, vytvořenými fotoleptem. Změna vzdálenosti rysků se projevuje ve změně vlnové délky odraženého světla, jak ukazují následující schematické obrázky:



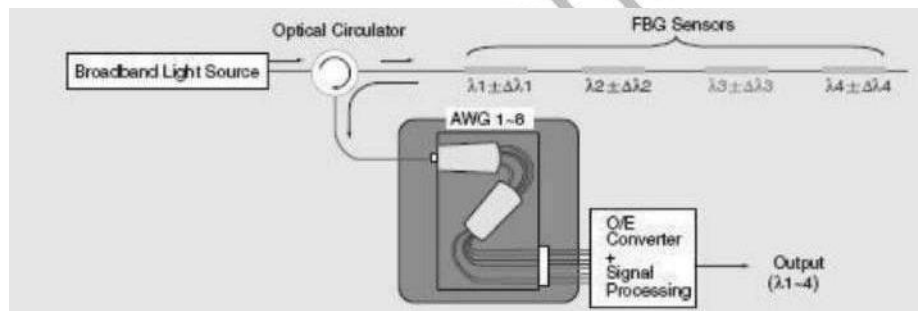


Zdrojem sv tla s m nitelnou vlnovou dĺlkou je laser.

Rozm ry optického vlákna (pr m r pod 0,25 mm), dovoľujú vlákno zabudovať do kompozitných konštrukcií a m it zm ny veli in. P ítomnosť vlákna neovlivní negativ ť životnosť konštrukcie ani p i dynamické únav .

Vlákno FBG zabudované do kompozitného listu v trné elektrámy m že sloužit i po dlouholetém provozu jako nové (nesmí ovšem dojít k jeho uvoln ní od okolní matrice).

Jedno optické FBG vlákno m že m it zm ny teploty a deformace po celé dĺlce, v níž je opat eno soustavou rťek, jak ukazuje následující obrázek:



M ící systém se skládá z výkonného laseru s m nitelnou vlnovou dĺlkou sv tla, otá ející se clo n ky-zrcadla ("Optical Circulator"), FBG vlákna, fotodetektoru, zesilova e, sv tlo/elektro p evodníku a jednotky pro zpracování signálu (obv ykle po íta e), který zp tn ovládá laser (citlivost systému je nejv tší p i optimální vlnové dĺlce sv tla vycházejícího z laseru).

Safírová optická vlákna

Krystal safíru ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) dobře propouští ultrafialové (UV), sv telné a infra červené (IR) zá ení. Velká chemická odolnost (chemická nete nost) umož ťuje i v siln korozivním prost edí p enášet optický signál. Safírová vlákna mohou pracovat i p i teplotách do 2000 °C (teplota tání safíru je 2053 °C). Využívají se jako teplotní senzory p i zply ování uhlí a v moderních uhelných elektrárnách. Vlákna jsou dobře ohebná (d ležitá v medicín , netoxická a biokompatibilní (product Bioceram[®]), mají velký modul pružnosti ($E=345$ GPa, pevnost v tahu 410 MPa a v tší povrchovou tvrdost než sklen ná vlákna. Vlákno se vyrábí tažením krystalu skrze molybdenovou kapiláru. Safírová vlákna a další produkty vyrábí spole nost Saint-Gobain Crystals (zna ky Saphicon[®] a Class[®] (sv tov nejv tší safírová okna)), spole nost Kyocera Co. (Japonsko, technologie zakoupena od Saint-Gobain), v eské republice Crytur (d íve Monokrystaly) se zna kou SapphiT[®].

Porušují se laserovými paprsky až p i vysokém výkonu (1200 J/sm^2).

<http://www.roditi.com/SingleCrystal/Sapphire/Properties.html>

Obal ("Cladding") pro menší teploty je z polytetrafluorethyenu (PTFE) nebo polyimidu (PI), z napa eného oxidu k emíku (do 1000 °C), oxidu ho íku a oxidu hliníku (do 1200 °C), p ípadn z oxidu zirkonu, pro v tší teploty z platiny nebo palladia, pro nejv tší teploty z kompozitu uhlík-uhlík..

Specifikace optických vláken ze safíru.

<http://www.photran.com/photranpages/productpages/fiberproperties.html>

Průměr jádra [μm]	150	250	325	425
Průměr s obalem a nárazníkem [μm]	400	450	650	750
Radiální [mm]	20	30	60	80
Standardní délka [m]	2	2	2	2
Maximální délka [m]	4	4	4	4

UHLÍKOVÁ VLÁKNA

<http://www.cs.Wikipedia.org/wiki/Uhlíkovévlákno>

<http://www.carbon-fiber.com/>

Mají nejširší spektrum mechanických vlastností i poměrně malé hustoty (1,8-2 g/cm³). Uhlík ve styku s méně ušlechtilými kovy vytváří galvanický pánek – dochází k elektrochemické korozi, při níž koroduje kov. Kompozit s uhlíkovými vlákny musí být proto od kovu oddělen nevodivým materiálem (například kompozitem se sklenými vlákny).

<http://www.thelenchannel.com/1galv.php>

http://en.wikipedia.org/wiki/Galvanic_corrosion

<http://en.wikipedia.org/wiki/Galvanicseries>

Po adf je upraveno podle Beketovy řady, v níž je titan a zinek k neušlechtilým kovům. Za přítomnosti kyslíku se však titan pokrývá stabilní nerozpustnou vrstvou oxidu (TiO₂, Ti₂O₃), které způsobují jeho netečnost.



Mikrostruktura uhlíkových vláken

Je známo, že krystal grafitu je značně anizotropní, ve směru kolmém k bazálním rovinám šesterečné mřížky působí jen slabé Van der Waalovy vazby, kdežto v rovinách bazálních vrstev, v tzv. „aromatických“ rovinách, jsou atomy vázány velmi pevnými kovalentními vazbami. Teoretická pevnost grafitového monokrystalu namáhaného tahem ve směru rovnoběžném s bazálními rovinami činí přibližně 100 GPa a teoretický modul pružnosti v tahu je přibližně 1000 GPa. Polykrytalický grafit s náhodně orientovanými krystaly je mřížkový a drobný v důsledku málo pevné vazby mezi hustě obsazenými rovinami (0001).

Modul pružnosti v tahu je pouze 10 GPa a pevnost v tahu 20 MPa. Při smykovém namáhání ve směru rovnoběžném s rovinami (0001) se pevné kovalentní vazby mezi uhlíkovými atomy v bazálních rovinách neporušují a dochází k snadnému pohybu těchto rovin vůči sobě. To je příčinou známého mazacího účinku grafitu při suchém tření.

Vysoké pevnosti a tuhosti aromatických rovin je využito v uhlíkových vláknech, ve kterých jsou bazální roviny orientovány převážně rovnoběžně s podélnou osou vlákna. Na rozdíl od krystalu grafitu nejsou **aromatické roviny** ve vlákně pravidelně uspořádány ve sledu ABABA (jak by odpovídalo hexagonální mřížce), ale jsou vedle sebe místy nahodile, v tzv. **turbostratickém uspořádání**. Vzdálenost mezi aromatickými rovinami je potom mírně větší, než je tomu u mřížky grafitu (0,34 až 0,345 nm oproti 0,335 nm u grafitu). Z těchto důvodů je nesprávný termín „grafitová vlákna“, a kolivní které zahraniční firmy pro výsoce tuhá uhlíková vlákna tento název používají.

Uhlíková vlákna se dnes vyrábí převážně z vláken polyakrylonitrilových (PAN), vláken novoloidu–vláken fenolaldehydových (Kynol®) a ze sulfonovaného polyethylenu.

Porovnání charakteristik uhlíkových vláken ze syntetických polymerních prekurzorů

	Novoloid (Kynol®)		PAN (90 % CF je z PAN)		Sulfonovaný PE-LLD ("Linear Low Density") Vývoj v ORNL 900	Lignin z měkkého dřeva Vývoj v ORNL
	800	2000	1500	2000		
Teplota zpracování [°C]	800	2000	1500	2000		
Hustota [g/cm ³]	1,5	1,4	1,8, 1,9	1,9-2,0		
Obsah uhlíku [% hmotnostních]	95	99,8	95	99,5		
Pevnost v tahu [MPa]	500 700	400 600	1500	3000	1150 až 2160	1070
Poměrné prodloužení při přetržení [%]	2,0 až 3,0	1,5 až 2,5	1,0-1,5		3	
Modul pružnosti [GPa]	200 – 300	150-200	150-300		60 až 130	82
Teploty počátku ztráty hmotnosti	476	575	560			
Vzd. 250 °C	0	0	0			
Vzd. 400 °C	2,8	2,2	2,4			
Chemická afinita k epoxidovým pryskyřicím	Dobrá		Horší			
Užití	Letecký průmysl		Letecký průmysl		Automobilový průmysl Cena 10 \$/kg	Automobilový průmysl Cena 7,7 \$/kg

Vhodný PAN je ve skutečnosti kopolymer. K monomeru akrylonitrilu se přidá monomer methylnakrylátové kyseliny (MA), kyselina methylnsuccinová (= "itaconic acid"), iniciátorem reakce je 2,2'azo-bis-isobutyronitril (n kdymísto monomeru methylnakrylátu je možno vycházet z monomeru methylmethakrylátu, MMA).

<http://www.whitbyresearch.co.uk/papers/Korobeink%20copolymer%20EPJ%202012.pdf>

Kyseliny fungují jako katalyzátory kopolymerizace. V hotovém vlákně, které se vyrábí v tavenině skrz kapiláry, se musí PAN skládat převážně z izotaktického PAN, který dává kvalitnější uhlíková vlákna než syndiotaktický a ataktický PAN. <http://www.freepatentline.com/7338997.html>

Dnes se viskózy ("rayon") již téměř nepoužívá, protože při vysokých teplotách dochází k velkým ztrátám hmoty při karbonizaci viskózy se přemění pouze 25 % hmoty na vodního vlákna. První komerční uhlíkové vlákno firmy Union Carbide obchodní značkou Thornel-25 bylo ovšem z viskózy vyrobeno (v roce 1964). Výroba uhlíkových vláken z viskózy je zavedena v belgické firmě Khimvolokno Sv. tlogorsk (vlákna Ural®). V závodě Argon (dříve Khimvolokno Balakovo) a ve vojenském a civilním leteckém závodě v Saratovu se již používají vlákna PAN od společnosti Khimpromengineering.

<http://www.fas.org/nuke/guidersussia/industry/saratov.htm>

http://www.minatom.ru/en/news14302_23032009

Ve směru osy vlákna jsou protáhle (acikulární) mikrokristaly turbostratického uhlíku, v případě vláken vyrobených z PAN, tvořeny vždy několika paralelními aromatickými rovinami. V příčném řezu vlákna pásy nedosahují v těchto rozměrech a jsou rozestaveny. V podélném směru vlákna jsou mikrokristaly vzájemně natočeny pod malými úhly (lze také říci, že pásy rovnoběžných aromatických rovin je vzájemně natočeny). Mikrokristaly lze v pásích detekovat RTG metodou, mají charakteristickou délku 10 až 50 nm. Ztloušťky pásů (transmisní elektronový mikroskop) lze odvodit, že je tvoří 10 až 30 paralelních aromatických rovin. Vlákno obsahuje též mikroskopické póry protažené ve směru podélné osy vlákna. Vedle těchto mikroskopických pórů vlákno obsahuje i submikroskopické dutiny mezi jednotlivými mikrokristaly. Submikroskopické dutiny mají v příčném řezu rozměr okolo 3 nm. Dle sledkem malého odklonu aromatických rovin mikrokristalů od podélné osy vlákna je, že vlákna z PAN nedosahují v těchto modulech pružnosti, přesto však mají modul pružnosti E větší než ocel. Vysokou pevnost tzv. středních vláken (IM uhlíková vlákna o pevnosti až 7000 MPa) zaručují jemné mikrokristaly a minimální množství defektů mezi nimi.

Postup výroby uhlíkového vlákna z PAN je možno rozdělit do tří etap:

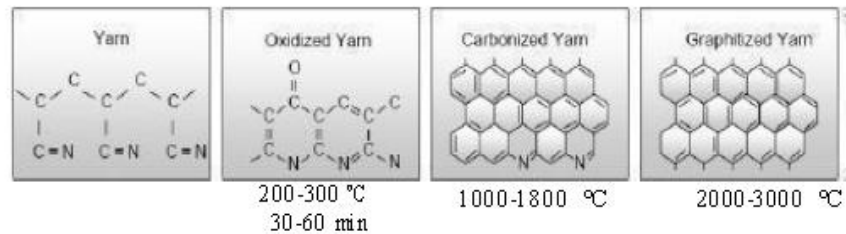
- **Stabilizace** – při teplotách 200 až 300 °C, za působení tahového napětí a v oxidálním prostředí je PAN vlákno stabilizováno. Dojde k cyklizaci vazeb v rámci makromolekuly PAN (vytvorení paralelních žebříkových makromolekul) a k vzájemnému zesílení makromolekul kyslíkovými mostky. Vlákno při této etapě ztmavne a stane se netavitelným.
- **Karbonizace** – při teplotách od 1000 do 1800 °C v inertním prostředí (velice čistý dusík) ve vlákně probíhá karbonizace (odstraní se vodík a sníží obsah dusíku a kyslíku, 80 až 95 % hmoty tvoří uhlík). Vlákno dosáhne maximální

pevnosti v tahu.

•**Grafitizace** - při teplotách do 3000 °C v prostředí argonu. Ještě více se zvětší obsah uhlíku a umožní se vznik dokonalejších mikrokrystalů. Vyvinutější mikrokrystaly vedou k zvětšení tuhosti vlákna.

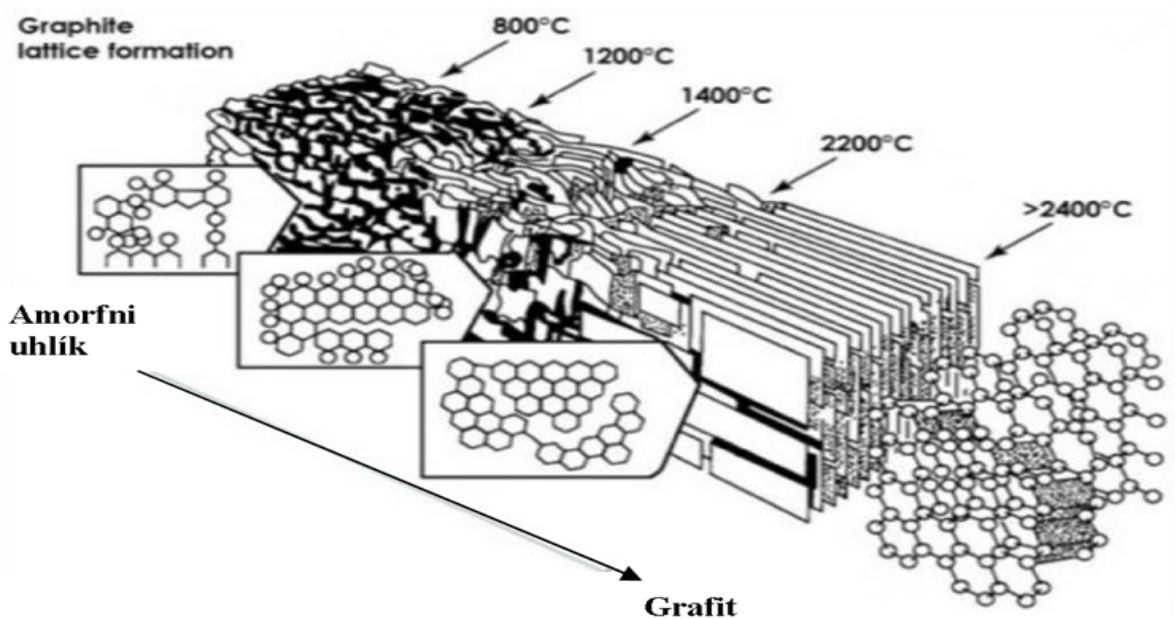
U vláken z PAN je při stejné tuhosti dosažen za cenu poklesu pevnosti, protože zvětšení velikosti mikrokrystalů vede též k zvětšování defektů mezi nimi. U nejtuzších vláken je používáno prodloužení při grafitizaci. Při prodloužení se zmenší úhel odklonu mikrokrystalů od osy vlákna (tzv. vysokomodulová vlákna (UHM, "Ultra High Modulus").

Změny struktury PAN vlákna jsou zobrazeny na následujícím obrázku.



Vliv teploty na tvar a velikost krystalů uhlíku

<http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkos/arch374/winter2002/psbm>

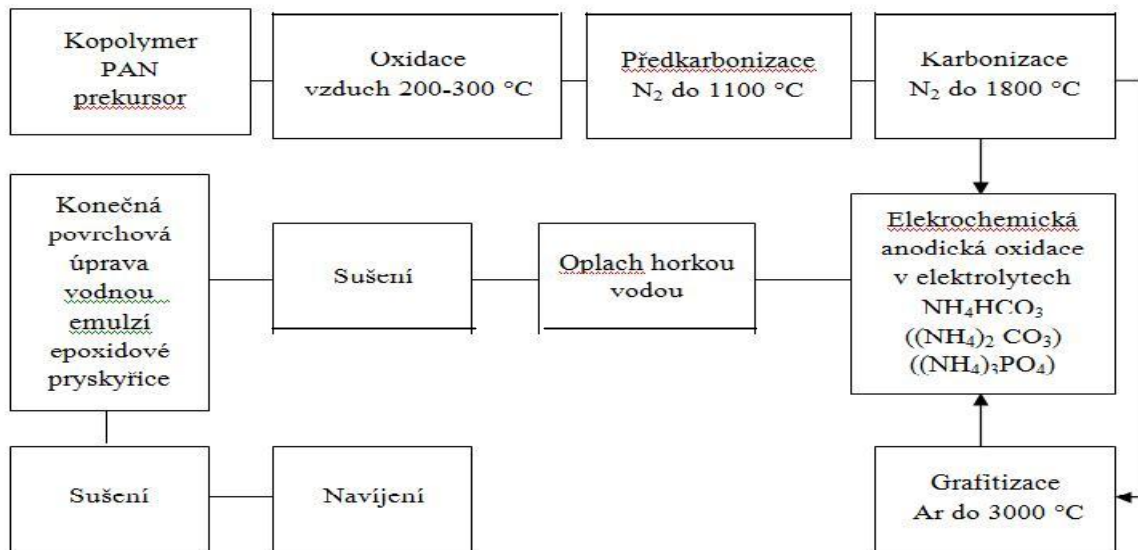


Linka na výrobu uhlíkových vláken

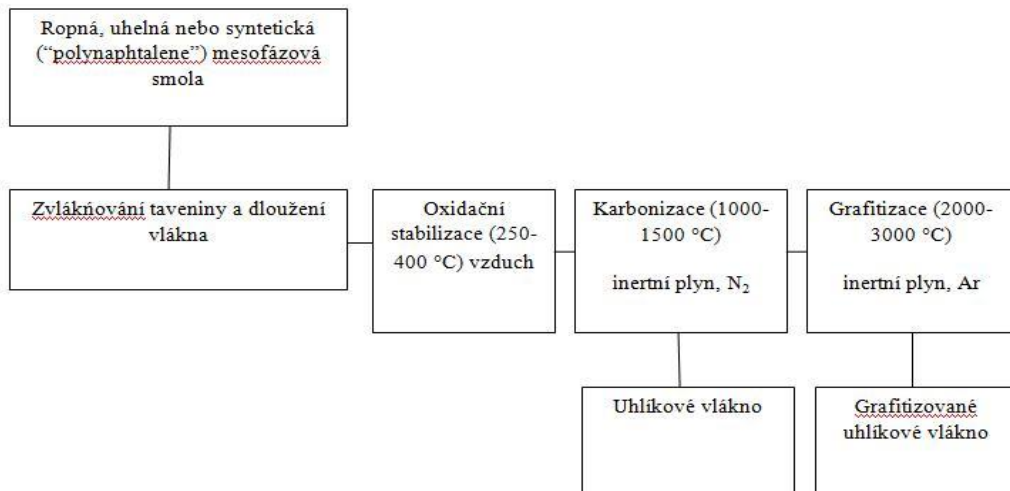
<http://www.harperintl.com/technologies/complete-lines/>



Celý proces výroby uhlíkových vláken z PAN je ukázán na následujícím obrázku (předkarbonizace je nyní kdy vynechána).



Pro výrobu nejuhličších uhlíkových vláken se používá smol (zbytek po destilaci ropných smol, nebo smol z černého uhlí). Velmi tuhá a přitom pevná vlákna poskytuje pouze tzv. mesofázová smola (v mesofázových smolách jsou aromatické roviny různé molekulové hmotnosti paralelně uspořádány, tj. i v tekuté smole jsou krystaly (smola s kapalnými krystaly (angl. "MesoPhase Pitch", MPP)). Postup při zpracování mesofázové smoly je znázorněn na dalším obrázku.



Při zvláknění taveniny smoly (po zahátí na potřebnou teplotu) se aromatické roviny orientují podél osy vlákna. Špičkové typy vláken, dosahující velkých hodnot modulu pružnosti v tahu E , se při grafitzaci ještě prodlouží. Vlákná ze smol mají jinou mikrotexturu než vlákna z PAN. Početnější paralelní aromatické roviny vytvářejí rozměrnější deskovité krystaly turbostratického uhlíku. Krystaly jsou téměř rovnoběžné s osou vlákna (aromatické roviny nejsou v též rovině). Jejich převládající uspořádání v příčném řezu je možno charakterizovat jako snopkovité, cibulovité, radiální, radiálně-zvlněné, smíšené nebo nahodilé. Ve vlákněch ze smol jsou vedle deskovitých krystalů turbostratického uhlíku též mikroskopické póry ve tvaru polyedru, turbostratické mikrokrystaly a polykrystalický grafit. Nejtužší komerčně vyráběná vlákna z mesofázových smol dnes dosahují modulu pružnosti v tahu E přes 900 GPa. Běžné typy vláken ze smol až donedávna nedosahovaly pevnosti vláken z PAN. Souviselo to se skutečností, že pevnost je určována defekty mikrostruktury kdežto modul pružnosti v tahu závisí na dokonalosti a velikosti mikroskopických krystalů a úhlu odchýlení aromatických rovin od osy vlákna. U velmi tuhých vláken z mesofázových smol, která mají kruhový průřez, může již při ohřevu vznikat tak velké vnitřní pnutí, že dojde k podélnému popraskání vláken. Zdokonalením výroby vláken z rafinovaných uhelných a ropných smol se podařilo podobné jevy odstranit a pevnost vysokomodulových vláken je jen o málo menší než pevnost standardních uhlíkových vláken z PAN. Velké tuhosti a souasně i velké pevnosti může být dosaženo také výrobou vláken s nekruhovým příčným průřezem.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622394902208>



Například u plochého průřezu na vzdálenějších koncích, tj. v místech, kde začínají lomové procesy, je pevná jemná mikrostruktura polyedricky tvarovaných shluků aromatických vrstev. Rozměrné, dobře vyvinuté deskovité krystaly, které nesměřují radiálně k povrchu vláken, ale leží paralelně se širší stranou průřezu, poskytují vlákně velkou tuhost. Plochá vlákna se také vyznačují velkou tepelnou vodivostí (350-700 W/mK). Obrázek ukazuje vlákna získaná při teplotě 319 °C (319 °C je teplota zvláknění prekurzoru), při které se dosahuje nejvyšší modulu pružnosti a pevnosti uhlíkového vlákna (modul $E=930$ GPa a pevnost v tahu 2750 MPa).

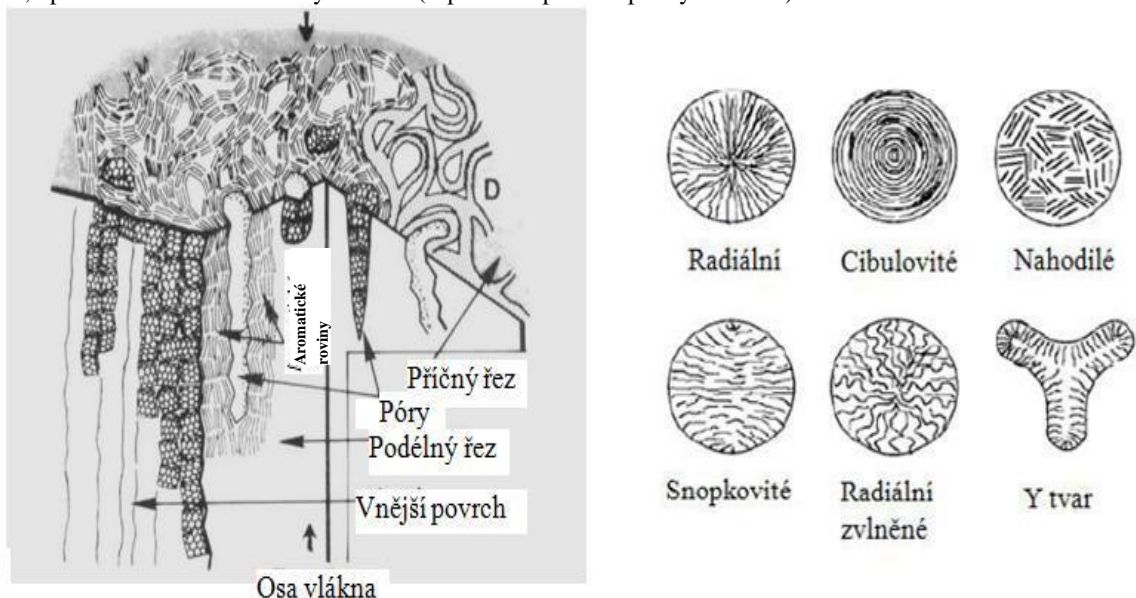
<http://44.206.159.178/FT/200/42291/765300.pdf>

Z mesofázových smol se vyrábějí také vlákna jiných průřezů – tvar “dog bone”, Y tvar (“tri-lobal” tvar), vlákna s podélnou trhlinou (s tzv. “Pac-Man” tvarem, který vzniká při karbonizaci při teplotách v těchž než 500 °C) a dutá vlákna (vznikají při zvláknění tryskou ve tvaru uzavřeného C).

Průřez vlákna, kromě tvaru zvláknovací trysky prekurzoru, závisí také na reologii smoly a rychlosti navíjení hotového vlákna.



Mikrostruktura uhlíkových vláken kruhového průřezu je znázorněna na následujícím obrázku - vlevo vlákno z PAN, vpravo vlákna z mesofázových smol (uspořádání pouze v příčných řezech)



Hlavní druhy uhlíkových vláken

Výrobní sortiment zahraničních společností tvoří:

- Karbonizovaná vlákna z PAN, která mají střední modul pružnosti a dobrou pevnost v tahu. Lze je považovat za standardní uhlíková vlákna HS ("High Strength") a AS ("Average Strength"), HT nebo HTA ("High Tenacity"), „tenacity“ je pevnost v tahu a karbonizovaná uhlíková vlákna ze sulfonovaného polyethylenu, nejlevnější uhlíková vlákna s cenou okolo 10 \$/kg.
 - Vysokomodulová grafitizovaná vlákna z PAN, HM ("High Modulus")
 - Vlákna velmi pevná z PAN, se středním modulem pružnosti IM ("Intermediate Modulus") a SHT ("Super High-tensile"), vlákna s pevností větší než 6500 MPa
 - Vlákna s velkým modulem pružnosti VHM a UHM ("Very High Modulus", "Ultra High Modulus"), vlákna z mesofázových smol, MPP ("Mesophase Pitch")
- ☞ Vlákna odolná vysokým teplotám, oxidovaná uhlíková vlákna Pyron[®] od firmy Zoltek a Panox[®] od SGL Group-The Carbon Company
- Dutá uhlíková vlákna
 - Diskontinuální vlákna porušená tahem (SBCF, "Stretch-Broken Carbon Fiber")
 - Mletá uhlíková vlákna
 - Recyklovaná uhlíková vlákna (v produktech mohou být různě dlouhá vlákna, delší vlákna (120-150 mm) jsou vhodná pro výrobu preform)

Společnosti Toray Teijin a Mitsubishi Rayon recyklují uhlíková vlákna v závodu firmy Mitsui, recyklaci se zabývá společnost Adherent Technologies, Inc. <http://www.adherenttech.com/composterecycling.htm> Společnost Adherent (ATI v Albuquerque, N.M.) bude spolupracovat se společností AMTII Corp. (Burke, Va.) (hlavní sídlo Delaware corporation je na Floridě). V roce 2014 bude vybudován nový závod na recyklaci kompozitů s uhlíkovými vlákny s kapacitou 5000 kg/den. <http://www.compositesworld.com/news/amtii-adherent-to-open-carbon-fiber-recyclingsizing-plant>

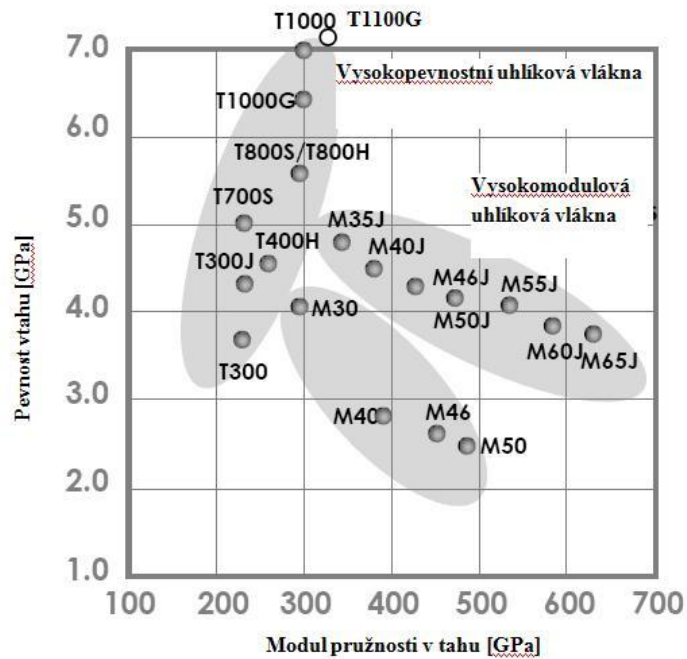
Boeing a Oracle Team USA budou vyvíjet recyklaci uhlíkových vláken při universitě v Nottinghamu (USA) a v Materials Innovation Technologies (USA), aby mohla být použita pro recyklaci vláken z letadel Boeing 787. <http://boeing.mediaroom.com/index.php?s=20295&item=128832>

Šetrně recyklovaná uhlíková vlákna (mokrý způsob recyklace) jsou znovu použitelná. Mletá uhlíková vlákna jsou používána pro dosažení elektrické vodivosti polymerů a jako jejich výztuž. Ani nejtužší grafitizovaná vlákna nelze považovat za čistá uhlíková, obsah uhlíku nedosahuje 100%.

Recyklovaná uhlíková vlákna produkuje společnost ELG Carbon Fibre, Ltd v U.K. Obchodní název je Carbiso V Německu působí společnost CFK Stade Valley Recycling, GmbH&co KG.

V USA byl v roce 2005 v Jižní Karolině umístěn závod MIT RCF, LLC pro recyklaci uhlíkových vláken

Další obrázek ukazuje rozsah vlastností uhlíkových vláken při teplotě 20 °C společnosti Toray Industries, Inc. Nejnovějším výrobkem společnosti Toray je vysokopevnostní vlákno T1100G. Oproti vláknu T1000 má větší modul pružnosti i pevnost.



Vlastnosti uhlíkových vláken z PAN při teplotě 20 °C podle Toray

TORAYCA - TYPICAL FIBER PROPERTIES										
FIBER TYPE	Number of Filaments	Sizing Type	Tensile Strength		Tensile Modulus		Elongation %	Yield g/1000m	Density g/cm ³	Standard Spool Size (kg)
			ksi	MPa	Msi	GPa				
T300	1,000	4,5	512	3,530	33.4	230	1.5	66	1.76	1.0
	3,000 ¹⁾	4,5						198		2.0
	6,000 ¹⁾	4,5						396		2.0
	12,000 ¹⁾	4,5						800		4.0
T300J	3,000 ²⁾	4	611	4,210	33.4	230	1.8	198	1.78	2.0
	6,000 ²⁾	4						396		2.0
	12,000 ²⁾	5						800		4.0
T400H	3,000	4	640	4,410	36.3	250	1.8	198	1.80	2.0
	6,000	4						396		2.0
T600S	24,000 ³⁾	5,6	600	4,140	33.4	230	1.8	1,700	1.79	6.0
T700S	12,000 ³⁾	5,6,F	711	4,900	33.4	230	2.1	800	1.80	6.0
	24,000 ³⁾							1,650		6.0
T700G	12,000 ³⁾	3	711	4,900	34.8	240	2.0	800	1.80	6.0
	24,000 ³⁾							1,650		6.0
T800H	6,000	4,5	796	5,490	42.7	294	1.9	223	1.81	2.0
	12,000							445		4.0
T800S	24,000 ³⁾	1	853	5,880	42.7	294	2.0	1,030	1.80	4.0
T1000G	12,000	4	924	6,370	42.7	294	2.2	485	1.80	2.0
M35J	6,000	5	683	4,700	49.8	343	1.4	225	1.75	1.0
	12,000							450		2.0
M40J	3,000	5	640	4,410	54.7	377	1.2	113	1.77	0.5
	6,000 ¹⁾							225		1.0
	12,000 ¹⁾							450		2.0
M46J	6,000 ¹⁾	5	611	4,210	63.3	436	1.0	223	1.84	1.0
	12,000 ¹⁾							445		2.0
M50J	3,000	5	597	4,120	69.0	475	0.8	109	1.88	0.5
	6,000							218		1.0
M55J	6,000	5	583	4,020	78.2	540	0.8	218	1.91	0.5
M60J	3,000	5	569	3,920	85.3	588	0.7	103	1.93	0.2
	6,000							206		0.4
M30S	18,000 ³⁾	5	796	5,490	42.7	294	1.9	760	1.73	4.0
M30G	18,000 ³⁾	1	739	5,100	42.7	294	1.7	760	1.73	4.0
M40	1,000	5	398	2,740	56.9	392	0.7	61	1.81	0.15
	3,000	4						182		1.0
	6,000 ¹⁾	5						364		1.5
	12,000 ¹⁾	5						728		4.0

Z dále následujících tabulek je zřejmé, že uhlíková vlákna mají obecně oproti skleněným vláknům menší průměr a menší průřez. Lze totiž vlákna lépe ohnout, takže je lze použít při výrobě tkanin a pletenin, a koliv jsou křehčí než skleněná vlákna. Vlákna z uhelných mesofázových smol Dialead od firmy Mitsubishi Plastics se vyrábí ve dvou provedeních: jednak jako vlákna pro letecký průmysl (menší počet monovláken v rovingu, 2K-6K), jednak jako vlákna pro průmyslové použití (větší počet monovláken v rovingu, 12K-16K).

Vlastnosti vysokomodulových uhlíkových vláken Dialead[®] vyrobených z uhlé mesofázové smoly firmou Mitsubishi Plastics, Inc.

Typ	Prmyslové (12K-16K)		Letecké (2K-6K)			
	K63712	K63A12	K1352U	K1392U	K13C2U	K13D2U
Průměr [μm]	10	10	10	10	10	10
Hustota [g/cm ³]	2,12	2,15	2,05	2,12	2,19	2,12
Modul E [GPa], osový	640	790	500	760	900	935
Tahová pevnost [GPa]	2,6	2,6	3,6	3,7	3,8	3,7
Poměrné prodloužení při přetržení [%]	0,4	0,3	0,6	0,5	0,4	0,4
Součinitel délkové teplotní roztažnosti [10 ⁻⁶ 1/K] osový příčný	-0,9 10	-1,5 6				
Tepelná vodivost [W/mK]	140	220	130	210	620	800
Obsah uhlíku [%]	>99	>99	>99	>99	>99	99

Uhlíková vlákna Granoc vyrobená z ropné smoly společností Nippon Graphite Fiber

■ YSH and YS Grade (7micron diameter) : Aerospace and sports application

Grade	Filament	Tensile modulus		Tensile strength		elongation %	density g/cm ³	Yield g/1000m
		GPa	MSI	MPa	KSI			
YSH-70A-10S	1000	720	105	3630	530	0.5	2.14	75
YSH-70A-30S	3000	720	105	3630	530	0.5	2.14	250
YSH-70A-60S	6000	720	105	3630	530	0.5	2.14	520
YSH-60A-10S	1000	630	92	3830	570	0.6	2.12	75
YSH-60A-30S	3000	630	92	3830	570	0.6	2.12	250
YSH-60A-60S	6000	630	92	3830	570	0.6	2.12	520
YSH-50A-10S	1000	520	76	3830	570	0.7	2.10	75
YSH-50A-30S	3000	520	76	3830	570	0.7	2.10	250
YSH-50A-60S	6000	520	76	3830	570	0.7	2.10	520
YS-90A-30S	3000	880	128	3530	510	0.3	2.18	250
YS-90A-60S	6000	880	128	3530	510	0.3	2.18	520
YS-80A-30S	3000	785	114	3630	530	0.5	2.17	250
YS-80A-60S	6000	785	114	3630	530	0.5	2.17	520

Vlákna XN jsou vyrobena z izotropní smoly. Mají menší modul pružnosti, ale velké prodloužení při přetržení.

Uhlíkové vlákno Pyrofil™ od Mitsubishi Rayon Carbon Fiber and Composites, Inc.

Typ vlákna	Počet monovláken	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Hustota [g/cm ³]	Tex	Prodloužení při přetržení [%]	Průměr vlákna [μm]
TR30S	3000	4410	235	1,79	200	1,9	7
TR50S	6000	4900	235	1,82	400	2,1	7
TR50S	12000	4900	240	1,82	800	2,0	7
TR50S	15000	4900	240	1,82	1000	2,0	7
TRH50	12000	4900	255	1,81	800	1,9	7
TRH50	18000	5300	250	1,82	1000	2,1	6
MR40	12000	4410	295	1,76	600	1,5	6
MR50H	24000	5680	290	1,81	960	2,0	5
MS40	12000	4410	345	1,77	600	1,3	6
HR40	12000	4410	395	1,82	600	1,2	6
HS40	12000	4610	455	1,85	430	1,0	5

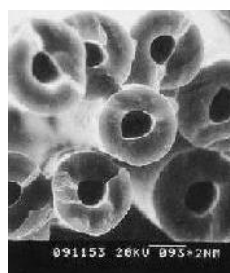
vložky

Uhlíková vlákna se vyznaují těmito zvláštnostmi:

- anizotropií mechanických vlastností - ve směru kolmém k ose vlákna mají vlákna modul pružnosti výrazně menší, na úrovni hodnot polykryštalického grafitu
- křehkostí - prodloužení při přetržení je menší než u skleněných vláken, minimální poloměr při ohýbání je proto v tloušťce než u skleněných vláken.
- záporným koeficientem délkové teplotní roztažnosti α , tj. při ohřevu se vlákno zkracuje (výjimkou jsou například vlákna XN od společnosti Nippon Graphite Fiber Corporation). Ve směru kolmém má α kladnou hodnotu, která je v tloušťce než u vláken skleněných.
- v podélném směru mají uhlíková vlákna malý elektrický odpor (jen $1,9 \cdot 10^{-6} \Omega/m$ u nejužších vláken)

Izotropní uhlíková smola a anizotropní mesofázová smola je také používána <http://www.mercorp.com> k výrobě dutých uhlíkových vláken. Dutý tvar je dosahován obvykle zvláknovací tryskou ve tvaru uzavřeného C. Kompozit z dutých vláken je lehčí (o 25 až 40%) oproti kompozitu z obvyklých uhlíkových vláken, jak ukazuje tabulka pro vlákna z izotropní smoly. Dutá vlákna se také vytvářejí při teplotách oxidací stabilizace u vlhkého PAN vlákna

		Kompozit s obvyklými vlákny
Hustota [g/cm ³]	1,15	1,68
Pevnost v tahu [MPa]	149	160



Průměr dutých uhlíkových vláken (15 a 20 μm) je v tloušťce než u obvyklých uhlíkových vláken. Jsou dány pokusy zpevnit jejich stěnu uhlíkovými nanotrubicemi.

Anizotropie obyčejných uhlíkových vláken se projevuje i v tepelné vodivosti. V podélném směru je nejvyšší u „vysokomodulových“ vláken z mesofázových smol.

Současní hlavní výrobci uhlíkových vláken

a jejich obchodní značky jsou následující tabulce (stav v roce 2015)

Výrobce	Země, stát	Obchodní značka	Typy	Prekursory
Grafil (nyní Mitsubishi Rayon Carbon Fiber and Composites, Inc.)	USA	Grafil	34-600 34-600WD 34-700 34-700WD TRW40 TRH50	PAN
Mitsubishi Rayon Carbon Fiber	Japonsko	Pyrofil	TR TRH MR MS	

Teijin/Toho Tenax	Japonsko	Tenax		PAN
Nippon Graphite Fiber	Japonsko	Graanoc		Mesofázové smoly
SGL The Carbon Group Aldila Výrobce golfových holí. Společnost byla koupena Mitsubishi Rayon Carbon Fiber and Composites, Inc.	USA N mecko USA Uhlíkové dráčky ("Shafts") jsou vyráběny laminací prepreg, navíjením prepreg nebo metrdou RTM. kdy pletený polotovár je ve form zastřknut epoxidovou pryskyicí	Sigrafil T Sigrafil C Panox Recafil		PAN Tepelně stabilizované oxidované vlákno, používá se například pro výrobu disků brzd letadel Recyklovaná vlákna Pouze krátká vlákna 10 až 40 mm Vložky obsahují vlákna dlouhá 230 mikrometrů
Technical Fibre Products	UK	Optimat		PAN
Cytec Solvay Group	Global Company	Thornel		PAN, smoly
Zoltek Companies v roce 2013 byla firma koupena společností Toray	USA	Panex 30 Panex 33 Pyron	Prmyslová vlákna	PAN
DuPont	USA	E-130		Mesofázová smola
Dow AKSA	Turecko	Aksaca	Prmyslová vlákna	PAN
Hyosung Corp.	Jižní Korea	Tansome		PAN
Khimvolokno Svetlogorsk	Bělorusko	Ural		viskóza
Argon	Rusko	Grapan, Rovilon UMNUKN-3(NSh) UKN-M UKN-P UKN 5000 UK-P Argo-3		PAN
Lirsot	Rusko	Koulon Granite UOL LU Elur		PAN
Uvicom	Rusko	LU Elur LZH- M Grapan UKN-H UK		PAN
Alabuga-Volokno	Rusko (Tatarstán)		Prmyslová vlákna	PAN
SABIC Produkce v Jižní Koreji u společnosti Hyosung	Saúdská Arábie		Je plánován nový závod v SA	PAN
Dalian Xinge Carbon Fiber Co. Ltd	Čína			PAN

Yingyou Group Co.	ína			PAN
Zhongfu Shenyang Carbon Fiber Co.	ína			PAN
Gansu HaoShi Carbon Fiber Co.	ína			PAN
Anshan East Asia Carbon Fibers Co.	ína			PAN
Yising Huaheng Carbon and Aramid Fiber Product Co.	ína			PAN
Weihai Tuozhan Fiber Co.	ína			PAN
Sinosteel Jilin Carbon Fiber Co.	ína			PAN
Sinosteel Jiangeheng Carbon Fiber Co.	ína			PAN
Jilin Tangu Carbon Fiber Co.	ína			PAN
Kemrock Industries	Indie	Jaitec		PAN
Formosa Plastic Group	Taiwan	Tairyfil		PAN

N které webové adresy pro uhlíková vlákna

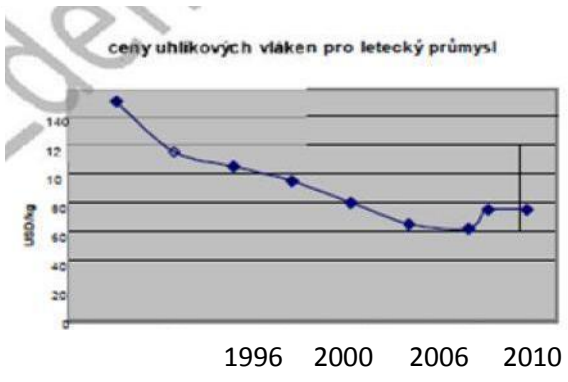
<http://www.grafil.com/> (USA, Mitsubishi Rayon Carbon Fiber and Composites, Inc.)
<http://www.mrc.co.jp/english/> (Japonsko, Mitsubishi Rayon Carbon Fiber and Composites, Inc.)
<http://www.hexcel.com/> (USA)
<http://www.cytac.com/engineered-materials/index.htm> (USA)
<http://www.toraycfa.com/product.html> (USA)
<http://www.tohotenaxamerica.com/companyphp?info=news>
http://www.teijin.com/about/group_worldwide/asia.html (Japonsko)
<http://www.aksa.com> (Turecko)
<http://www.sohim.by/en/catalog/carbon/> (Bělorusko)
<http://www.advtech.ru/lirsot/english.htm> (Rusko)
<http://www.hccomposite.com/en/companystructure/154/> Argon, Rusko)
<http://www.uvicom.com/en/component/content/article/121.html> (Rusko)
<http://en.sinosteel.com/cpyw/cpml/tszp/indexs.html> (ína)
<http://www.kemrock.com/> (Indie)

Americké společnosti Zoltek se podařilo výrobou z levné suroviny (maarské textilní vlákno PAN), produkcí malého počtu typů a výrobou pramenů obsahujících velký počet jednotlivých vláken (50K) snížit cenu natolik, že uhlíková vlákna začala být aplikována i ve stavebnictví (například zpevnění pilířů silničních mostů). V roce 2013 byla firma koupena společností Toray.

Vývoj ceny uhlíkových vláken pro letecký průmysl 1K-24K (K=kilo=tisícovky jednotlivých vláken, čím je číslo před K menší, tím větší je cena cívky rovingu) vzhledem k nedostatku vhodného PAN a rozsáhlému použití uhlíkových vláken u nových letadel (Boeing 787 a Airbus 350XWB) ukazuje graf.

http://www.oxeon.se/uploads/Media/20061106%20Olofsson_Presentation.pdf

Úseky v grafu ukazují rozsah cen uhlíkových vláken. Těžiště úseků leží na úseku průměrných cen, protože záleží také na typu vlákna a množství jejich produkce.



V R uhlíkové, aramidové, hybridní (uhlík+aramid) a skelné tkaniny, rovingy pásy sendvičové struktury a epoxidové systémy dodává firma GRM-systems <http://www.grm-systems.cz/>

Ceny uhlíkových tkanin lze nalézt na <http://www.shopmaninc.com/carbonpage.html>, ostatní vlákna (včetně hybridních tkanin), pryskyřice, materiály pro VBM ("Vakuum Bag Moulding"), separátory, lepidla, plniva, duté mikrokuličky, nástroje pro kontaktní laminaci a vybavení pro stříkání gelcoat je možno zakoupit na <http://www.shopmaninc.com/products.html>

Úprava povrchu uhlíkových vláken

Vyrobena uhlíková vlákna jsou podobná jako vlákna skleněná dodatečně upravena. Účelem je:

- odstranit z povrchu vláken látky bránící kontaktu s matricí.
- omezit další adsorpci plynu na povrch vláken
- zvýšit reaktivitu povrchu vůči vazebným prostředkům a matricím
- chránit vlákna před vzájemnou abrazí (uhlíková vlákna jsou křehčí než skleněná)

Jestliže reaktivita ploch aromatických rovin je malá, jejich hrany a rohy jsou velmi reaktivní a vážou kyslík, oxidy uhlíku, karboxylové kyseliny, karboxylové, hydroxylové a případně aminové a kyanové skupiny. Vlhkost a plynné látky mohou způsobit potíže při výrobě kompozitů, protože zůstávají pouze fyzikálně vázány. Během vytvrzování matrice za vyšších teplot se vlhkost odpařuje za vzniku mikroskopických plynových bublinek obalujících vlákna. Zabránit se tomu dá buď:

- odplyněním povrchu vláken vakuovou desorpcí
- rozpuštěním adsorbovaných látek v pryskyřici při vhodném režimu vytvrzování
- úpravou povrchu vláken

Nejlepší je se vyrobena vlákna chránit polymerními povlaky na bázi epoxid nebo polyimid, jejichž účelem je zabránit adsorpci látek a zároveň poskytnout vláknům ochranu před abrazí.

U vláken s aromatickými rovinami rovnoběžnými s povrchem (standardní vlákna z PAN) je účelné aktivitu povrchu zvýšit a povrch vláken zdrsňovat. Nejlepší je mokrá způsob, spočívající v čistém chemickém působení oxidací látek (HNO_3 , chromová kyselina, chlornatan sodný) nebo elektrochemický způsob, spočívající v anodické oxidaci vláken v elektrolýtech. U vláken s příznivější mikrotexturou lze aplikovat i suchý proces- termickou oxidaci.

Nejnoveji je používána kontinuální úprava studeným vysokofrekvenčním plazmatem, vytvářeným reaktorem pracujícím při frekvencích středavého proudu okolo 15 MHz. Podle použitého plynného prostředí (kyslík, argon, pánev a další látky například monomery) je dosahováno různých účinků:

- leptání a zdrsňování povrchu, doprovázené často i poklesem pevnosti (při použití kyslíku)
- očištění vláken, které vede k ztvrdnutí povrchové energie a k zlepšení smáčivosti pryskyřicí
- implantace funkčních skupin na očištěný povrch (při použití pávku jde o aminové skupiny)
- polymerace monomeru na povrchu vláken, jestliže se do proudu plynu přidává vhodný monomer.

Pro epoxidové matrice se osvědčilo plasmové zpracování s použitím pávku, (případně s atmosférou směsi pávku a argonu), které vede k téměř dvojnásobnému zvýšení smykové pevnosti rozhraní vlákna a matrice. Plazmatovou polymerací lze vytvořit na uhlíkovém vlákně dobře ulpívající polymerní (například polypropylenový) povlak a tak dosáhnout afinity k polymerní matrici. Často je po implantaci chemických skupin na povrch vláken pozorováno ztvrdnutí tahové pevnosti, které je vysvětlováno zahojením povrchových defektů vytvářeným povlakem.

Na očištěný povrch se mechanicky fyzikálně i chemicky lépe vážou funkční skupiny povlaků nanášených za mokra. Používají se například oligomery na bázi epoxid nebo polyimidy rozpuštěné v organických rozpouštělech. Existují také blokované kopolymery, které v hotovém povlaku vytvoří vrstvu s přírodní afinitou k polymerní matrici.

Kompozity vyrobené z očištěných a upravených uhlíkových vláken mají velkou smykovou pevnost rozhraní vláken a matrice i velkou mezilaminární (interlaminární) smykovou pevnost. Použije-li se navíc mezifáze v podobě tvárného polymerního povlaku, zlepšuje se odolnost kompozitu proti vzniku podélných trhlin v rozhraní vlákno/matrice, které se jinak objevují při mechanickém namáhání kompozitu bez této mezivrstvy. Lubrikační látky jako polyvinylalkohol nebo silikonový olej, silně zhoršují, až znemožňují vazbu vláken a matrice, ale na druhé straně zvyšují schopnost kompozitního dílu pohltit energii, například při namáhání rázem. Vlákna se totiž při lomu snadno vytahují z matrice a nedochází k jejich porušení v rovině šířící se lomové trhlinou. Proces vytahování vláken spotřebovává více energie než je energie spotřebovaná na tvorbu lomových povrchů vláken. Pro ztvrdnutí houževnatosti při zachování dobré soudržnosti vláken a matrice je výhodné opatřit vlákna například plnivým povlakem kaučuku, který způsobí, že vytahování vláken je doprovázeno v těmto směrech. Pro dobrou únavovou odolnost a velkou statickou pevnost kompozitu jsou však samozřejmě nevratné procesy, odehrávající se v mezifázovém rozhraní vlákno/matrice, nepřijatelné.

Značení uhlíkových vláken

Označení vláken není jednotné, název produktu Tenax Toho za jiným symbolem určujícím hlavní vlastnost vlákna (HMS, HTA, IMS, AS atd.). Společnost Toray používá pro svá vlákna Torayca® (vlákna z PAN) symbol T, po němž následuje číslo tím vyšší, čím větší je pevnost. Nejtužší vlákna firmy Toray (grafitizovaná vlákna z PAN) mají po číselném písmenu M.

Označení vláken ze smol obvykle tvoří písmeno P ("pitch"), po němž následuje tím větší číslo, čím větší je tuhost vlákna (například Thomel® P-120 od firmy Cytec Engineered Materials má modul pružnosti $E=830$ GPa).

Rovingy a pásy z uhlíkových vláken mají značení polotovaru podobné jako v případě vláken skleněných. Například pramen vláken Torayca® označený

T700SC-12000-50C

obsahuje vlákna typu T700S, druzená v nekrouceném pramenu, počet vláken je 12000 (12K) s povrchovou úpravou typu 50 znamená, že vlákno je povrchově upraveno a C udává množství povrchového prostředku.

Celokompozitová křídla letadla Boeing 787 "Dreamliner" jsou vyráběna z uhlíkových vláken T800S od společnosti Toray. Tato vlákna jsou použita i pro trup, ocasní plochy a nosníky podlahy. Společnost Hexcel dodává uhlíková vlákna pro letadla Airbus 350 XWB a proto buduje nový závod ve Francii.

Uhlíková vlákna SBCF ("Stretch Broken Carbon Fiber")

<http://www.compositesworld.com/hpc/issues/2008/March/112683>

<http://www.cats.rpi.edu/CATSIABSpring06/Activeooling.pdf>

Jednosměrné a tkaninové prepregy s kontinuálními uhlíkovými vlákny mají omezenou tvarovatelnost. Tato skutečnost vedla k vývoji prepregů s diskontinuálními uhlíkovými vlákny. Délka fragmentů zaručuje dostatečné mechanické vlastnosti kompozitu a přitom zlepšuje schopnost prepregu tvarovat se okolo hran, v prohlubních a vypuklinách. Lepší tvarovatelnost je způsobena tím, že fragmenty se mohou ve viskózní matrici reaktoplastu (nebo roztaveného termoplastu) na sobě nezávisle pohybovat.

Diskontinuální uhlíková vlákna firmy Hexcel (USA) se vyrábějí natahováním kontinuálních vláken bez povrchové úpravy vláken (AS4 nebo M7, 12K nebo 6K), při kterém dojde k přetržení vláken v jejich slabých místech. Fragmenty zůstávají rovnoběžné, se stejnou délkou okolo 10 cm. Fragmentovaný svazek vláken (maximální deformace 11 %) je potom opět epoxidovou povrchovou úpravou (vodný roztok epoxidu) a navinut na cívku.

U firmy Schappe Techniques (Francie) jsou fragmentovaná vlákna smíšená s vlákny termoplastu, matrice je potom termoplastická.

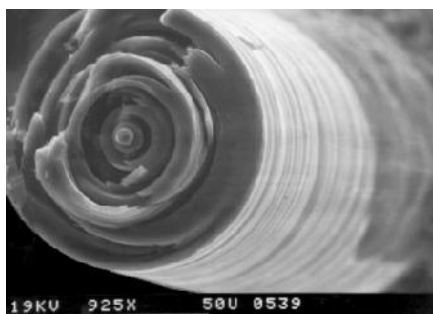
Na výstavě JEC 2013 společnost SGL Group (Německo) představila pro SBCF produkty Sigrafil CSBY70 a Sigrafil C50 (první z pramenů 50K a druhý z pramenů 24K).

Krátká uhlíková vlákna VGCF ("Vapour-Grown Carbon Fibers")

<http://www.apsci.com/home.htm>

Jsou vyráběna z uhlovodíkových par firmou Applied Science, Inc., Ohio, USA. Organokovová směs je vstříkována do prostředí uhlovodíkových par, majících teplotu 1000 °C. Malé částice pentakarbonylu železa ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) působí jako katalyzátory precipitace krátkých uhlíkových nanovláken. Vlákna rostou v parách, proto bývají označována VGCF. Rostou díky vláknu do mikroskopických průměrů je dosažen další kondenzací par a nánosem pyrolytického uhlíku. Produkt je plynule odebrán z reaktoru, který neobsahuje žádnou pohyblivou část. Přítomnost síry je nezbytná pro rychlý růst uhlíkových vláken. Lze využít práškové sirnaté uhlí (částice menší než 60 μm). Molární poměr síry a katalyzátoru je 1,6. Vlákna jsou vysoce grafitická.

Obvyklý průměr VGCF vláken je od 150 do 200 nm (za nanovláčko je tedy možno považovat pouze Pyrograf III) s poměrem délky ku průměru od 40 do 200. Aromatické roviny uhlíku jsou orientovány okolo osy vlákna (slupkovitá (cibulovitá, tangenciální) struktura), což poskytuje vláknu větší odolnost proti oxidaci.



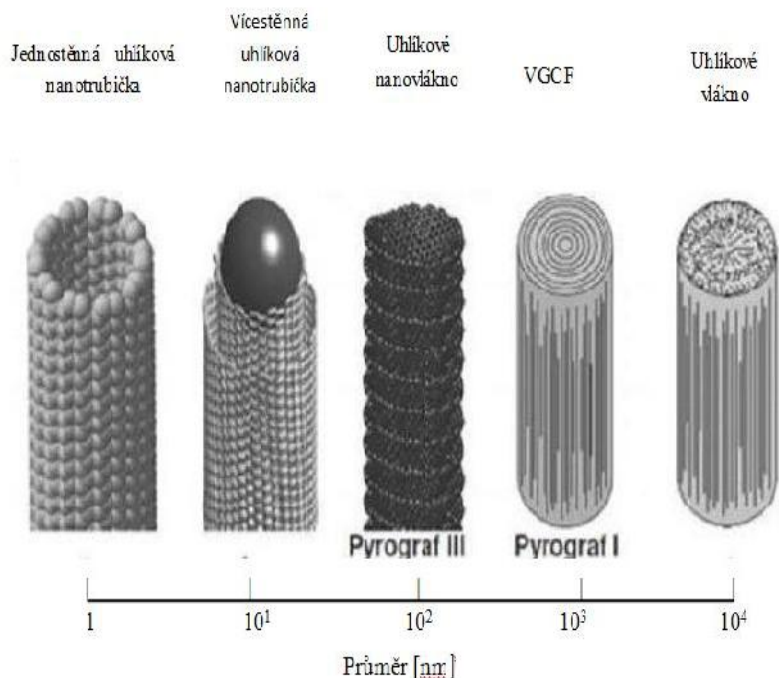
Morfologie vlákna Pyrograf I

Vlastnosti vlákna Pyrograf III uvádí následující tabulka a v další tabulce jsou uvedeny základní parametry všech vláken Pyrograf

	Bez tepelné úpravy	Tepelně upravené
Průměr [μm]	0.1 to 100 μm ; obvykle 0.2 μm	0.1 to 100 μm ; obvykle 0.2 μm
Pevnost v tahu [GPa]	2.7	7.0
Modul pružnosti v tahu E [GPa]	400	600
Prodloužení při přetržení [%]	1.5	0.5
Hustota [g/cm^3]	1.8	2.1

Oblasti aplikací krátkých uhlíkových vláken Pyrograf jsou:

- Vytužení a zpevnění termoplast
- Zvýšení elektrické vodivosti barev a jejich elektrostatickým nanášením
- Zvýšení tepelné vodivosti v elektronice-kompozity s kovovou maticí (viz hodnoty vlákna Pyrograf I se silnou vrstvou pyrolytického uhlíku).
- Elektromagnetické stínění u krytů elektronických zařízení Odstranění statické elektřiny u nádob s pohonnými hmotami
- Elektrody lithiových baterií



Uhlíková vlákna z nanotrubiček

http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube

<http://www.cnt-tech.com/>

<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/304/5668/276>

<http://thefutureofthings.com/news/1292/superthread-strongest-carbon-nanotube-ever.html>

Uhlíkové nanotrubičky se vyrábějí více způsoby

- Metodou CVD (katalyzovaným roztokem z par prekurzoru CNT na substrátu)
- V elektrickém oblouku
- Laserovou ablací grafitu
- Plasmatickou metodou

Nanotrubičky se rozdělují podle elektrické vodivosti na „kovové“ („metalonanotubes“) a polovodičové.

V laboratořích „Los Alamos National Laboratory“ vyvinuli výrobu „dlouhých“ (metodou CVD) dvoustěnných uhlíkových nanotrubiček (DWNT, „Double-Wall Carbon Nanotube“), které byly spřádány. V roce 2004 se tamtéž u jedностěnných nanotrubiček (SWNT, „Single-Wall Carbon Nanotube“) dosáhlo délky 40 mm, v roce 2013 se metodou CVD na křemíkovém substrátu dosáhlo délky 550 mm.

<http://www.sciencedaily.com/releases/2004/09/040917091336.htm>

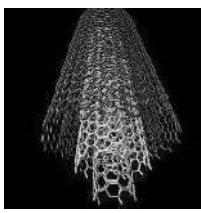
Licenci ke komerční výrobě získala firma CNT Technologies, Inc. (podnik byl založen v roce 2006 v Seattle, stát Washington, USA). Vlákna jsou produkována pod obchodním názvem SuperThread™ v novém závodě v Los Alamos. Superpevná vlákna mají oproti uhlíkovým vláknům výrazně vyšší pevnost, při menší hustotě (nanotrubičky jsou duté, s hustotou od 1330-1400 kg/m³ u jedностěnných nanotrubiček a 2600 kg/m³ u více-stěnných nanotrubiček (MWNT, „Multi-Wall Carbon Nanotube“)).

Výzkum pro špičkové spřádání uhlíkových vláken z reaktoru pro syntézu nanotrubiček (zdroj uhlíku a sloučenina železa jako nanokatalyzátor, je prováděn též na univerzitě Cambridge na „Department of Materials Science and Metallurgy“.

<http://www.msmcam.ac.uk/departments/profiles/windle.php>

Vlákno spřádané z uhlíkových nanotrubiček odtažených z lesa nanotrubiček vyrábí také australská společnost CSIRO.

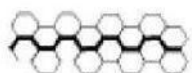
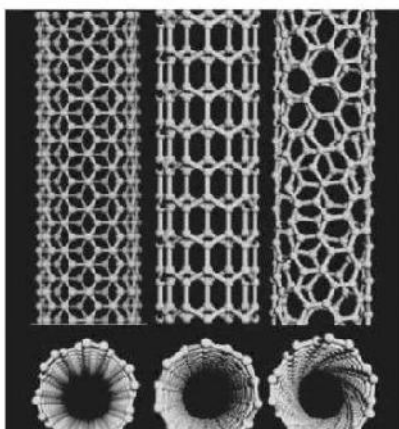
<http://www.csiro.au/science/Carbon-Nanotube-Yarn.html>



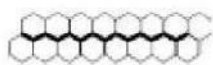
MWNT

Nanotrubi ky mohou mít různé struktury v závislosti na poloze šestistupu uhlíkových atomů: kešilkovou, cik-cak a chirální. Skutečné uspořádání se však od idealizovaných modelů v tšinou liší., Plošné uspořádání dává Grafen.

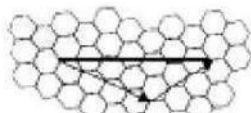
<http://www.aip.org/tip/INPHFA/vol-10/iss-1/p24.html>



K esílková struktura



Cik-cak struktura



Chirální struktura

Srovnání tuhosti E a pevnosti uhlíkových nanotrubiček a nejpevnějších a nejtužších uhlíkových vláken

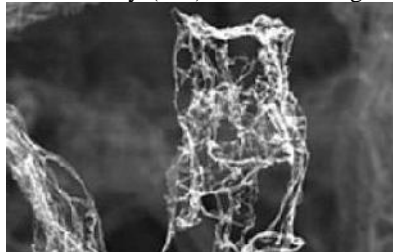
	Modul pružnosti v tahu [TPa]	Pevnost v tahu [GPa]	Prodloužení při přetržení [%]	Hustota ("true") [g/cm ³]	Průměr
Jednotěnná nanotrubička SWNT (experiment)	1-5	13-56	16	1,3-1,4	1-2 nm
Jednotěnná nanotrubička SWNT, křesílková struktura (teorie)	0,94	126,2	23		
Jednotěnná nanotrubička SWNT, cik-cak struktura (teorie)	0,94	94,5	15,6-17,5		
Jednotěnná nanotrubička SWNT, chirální struktura (teorie)	0,92				
Vícetěnná nanotrubička MWNT (experim T1100G)	0,324	6,6	11-63-150	2,6	5-20 nm
Nejpevnější uhlíkové vlákno Torayca [®] T1000	0,3	7	2,2	1,8	5 μm
Nejtužší uhlíkové vlákno Dialead [®] K1D2U	0,935	3,7	0,4	2,12	10 μm

V poslední době se do uhlíkových prepregů přidávají uhlíkové nanotrubičky (prepreg Arovex™), aby se zvýšila lomová houževnatost laminátů (nanotrubičky přemostují trhlinu).

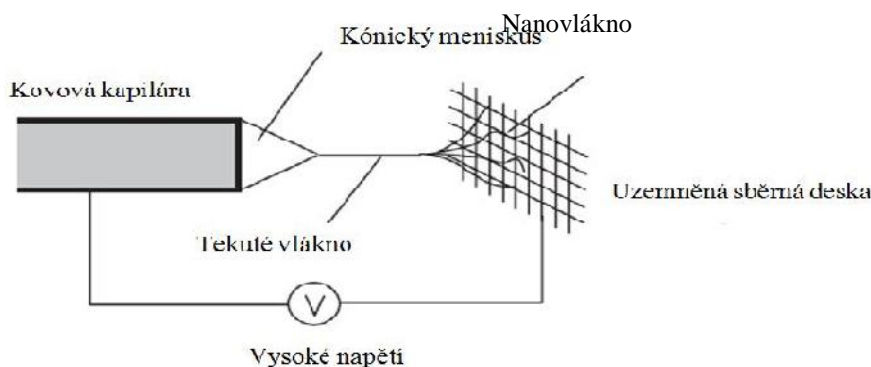
http://www.zyvexpro.com/performance_enoa.html

U letadel F35 (USA) obsahují některé díly epoxidovou pryskyřici zpevněnou CNT. CNT také zlepšují antibalistické vlastnosti tkanin.

Pórovitá síť CNT ("Carbon Nanotube") je nejlehčí materiál na světě (tzv. uhlíková pna). Jeho hustota je $0,2 \text{ mg/cm}^3$. Vynulili je nejen v dělně na Kiel University (KU) a na Hamburg University of Technology (TUHH). Nazvali je "Aerographite".



Nanovlákná z uhlíkových nanotrubiček se také vyrábí „elektrovláknováním“. V proudu vycházejícím z menisku kapaliny se jednotlivé nanotrubičky orientují ve směru osy nanovlákná. Podstata elektrovláknování je na obrázku.



U neizolovaných uhlíkových nanočástic (například nanotrubičky uvolněné z kompozitů) je toxicita větší než u vláken azbestu (v plicích působí také karcinogenně). Kromě přírodních uhlíkových nanotrubiček existují také a "diamonds nanorods" (DNR) a vlnité uhlíkové nanotrubičky ("Coiled Carbon nanotube").

<http://en.wikipedia.org/wiki/Nanotechnology> <http://www.fas.org/sgp/crs/misc/RL34614.pdf>

<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=carbon-nanotube-danger> Na YouTube je video

"Down to the Nanoscale" <https://www.youtube.com/watch?v=Y4TwpOiUJxc>

Uhlíkové whiskery GCN ("Grown Carbon Nanoparticles")

<http://en.wikipedia.org/wiki/Monocrystallinewhisker>

Mají průměr okolo $1 \mu\text{m}$ a pevnost v tahu až 20000 MPa. Existují dvě metody výroby GCN z plynných sloučenin za působení kovových katalyzátorů a nejnověji i bez kovů:

Vyrábí se:

- na zeolitové, keramické nebo hliníkové podložce metodou CVD (uhlovodíky C_2H_2 , C_2H_4 , CH_4)
- ve vznosu za přítomnosti organokovových sloučenin ($\text{Fe}(\text{CO})_5$, $\text{Ni}(\text{CO})_5$, $\text{Co}_2(\text{CO})_8$, $(\text{C}_5\text{H}_5)_2\text{Fe}$, $(\text{C}_5\text{H}_5)_2\text{Ni}$)CO

Velmi čistý uhlík GCN je využíván například pro elektrody baterií a ve zdravotnictví.

Levná uhlíková vlákna pro automobilový průmysl ("low-cost carbon fiber", LCCF)

<http://www.compositesworld.com/ct/issues/2006/June/1320>

Ke zlevnění uhlíkových vláken, které by vedlo k jejich širšímu použití na součásti automobilů, lze využít více postupů:

- použití ligninu jako prekursoru uhlíkových vláken (lignin je odpadní surovina při výrobě papíru)
http://www.if.ufrj.br/biolog/art_citados/lignin-based%20carbon%20fiber.pdf
- použití textilního PAN (s methakrylátem nebo vinylacetátem) jako prekursoru
- zkrácení doby oxidace prekursoru (v plasmatu)
- zlevnění karbonizace prekursoru (používá se mikrovlnný ohřev v plasmatu)
- použití sulfonovaného polyethylenu (případně PE-LLD, "Linear Low Density" PE) jako prekursoru (sulfonace je nutná pro zajištění netavitelnosti vlákná).

Sulfonace se provádí se v kyselině chlorsírové (HSO_3Cl) nebo v kyselině sírové, případně v dýmající kyselině sírové (nebo ve směsi sírových kyselin). Vlákno prekursoru se zesítí (a ztení) a vydrží karbonizaci teploty ($900 \text{ }^\circ\text{C}$). Příčný průřez uhlíkového vlákná je dán průměrem zvláknovací trysky vlákna PE. RTG difrakce vlákná po karbonizaci ukazuje na malý podíl krystalické fáze, takže někdy je mluveno o amorfním uhlíkovém vlákně.

<http://www.ecofriend.com/ornl-develops-process-convert-polyethylene-carbon-fiber.html>

<http://worldwidescience.org/topicpages/c/carbon+fiber+precursors.html>

Spolupráce "Oak Ridge National Laboratory" (ORNL) s konsorciem automobilových producentů složeným z firem Ford Motor Co., General Motors Corp. a DaimlerChrysler AG (od roku 2007 Chrysler LLC) vedla k vývoji technologie snižující cenu uhlíkových vláken. ORNL vyvinula novou metodu vysokorychlostní oxidace v plasmatu a mikrovlnný ohřev v plasmatu při karbonizaci. Součástí byla vyvinuta nová metoda aktivace povrchu uhlíkových vláken, zaručující dobrou vazbu vlákna a matrice.

V programu "Automotive Lightweighting Materials" použila firma Hexcel Co. textilní PAN. A koliv pevnost získaných uhlíkových vláken, menší vlivem v tísí defektnosti prekursoru, jejich modul pružnosti zůstává nezměněný. Pod programem "FreedomCAR" laboratoře ORNL a Pacific Northwest National Laboratory pokračovaly ve vývoji prekursoru na bázi ligninu.

V roce 2011 zahájil produkci uhlíkových vláken závod společnosti SGL Automotive Carbon Fibers (v USA). Lze předpokládat, že cena uhlíkových vláken pro automobilový průmysl se bude pohybovat okolo 10 \$/kg. Další možností je použití recyklovaných uhlíkových vláken, jejichž kilogramová cena je podobná.

Oblasti potenciálního použití uhlíkových vláken na osobním automobilu znáky Volkswagen XL1



Hybridní (diesel-elektrický) automobil VW XL1

ukazuje následující obrázek.

<http://www.compositesworld.com/articles/automotive-cfrp-the-shape-of-things-to-come>



Automobilka Ford se zavázala snížit hmotnost automobilů o 340 kg do roku 2020. V nejbližších letech hodlá vyrábět přední kapoty z uhlíkových vláken. Vývoj nových komponent probíhá v součinnosti evropského vývojového centra Fordu, ministerstva pro inovace, v ústavu a výzkum Severního Porýní-Vestfálska, společnosti Dow Automotive Systems, univerzity v Aachen a firem Henkel, Evonik, IKV a Composite Impulse. Výsledkem bude měla být sendvičová kapota sestavená z předního jádra a CFRP potah. Úsporná výroba zhotovování přední kapoty z CFRP není tak vysoká, aby bránila implementaci do velkosériové výroby a proto byla shledána vyhovující. Použití uhlíkových vláken uspoří palivo, lehčí automobil vyhovuje také p řísnějším emisním normám a snižuje pokuty za nadprodukcii oxidu uhličitého

Poniklovaná krátká uhlíková vlákna

<http://Tenax/en/products/mcphp>

Vyrábí je firmy Cytec Engineered Materials a Toho Tenax America. Vrstva niklu na povrchu uhlíkových vláken zvyšuje elektrickou vodivost, korozní odolnost a zajišťuje feromagnetické vlastnosti výztuže. Protože moderní počítače a mobilní telefony pracují při vysokých frekvencích a je zapotřebí je stínit před elektromagnetickou interferencí, používají se na jejich kryty termoplasty (především PBT, ABS, PC a PA), vztužené poniklovanými uhlíkovými vlákny. Poniklování se provádí metodou CVD.

Stínění zaručí i levnější vlákna z nerezavějící oceli, ale ta mají pro výztuž polymer příliš velkou hustotu. Stínění vojenských plavidel z kompozit (proti pronikání elektrických signálů z lodí) zajišťují mřížky vložené do stěny trupu.

POLYMERNÍ VLÁKNA

<http://www.etbyu.edu/groups/strong/pages/articles/articles/fibers.pdf>

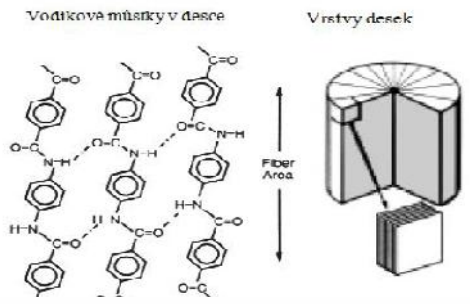
K nejvčetnějším přednostem polymerních vláken patří jejich malá hustota. Vlákna s malou hustotou a velkou pevností v tahu mají velkou měrnou pevnost, vlákna velmi tuhá s malou hustotou mají velký měrný modul. Běžná polymerní vlákna, polyethyltereftalátová (PET), polyamidová (PA6 a PA66) a polyakrylonitrilová (PAN) mají pevnost a hlavně modul pružnosti v tahu hluboko pod hodnotami skleněných vláken. Dloužením z taveniny lze dosáhnout zvýšení pevnosti maximálně na 1000 MPa, ale modul pružnosti se zvyšuje velmi málo (maximálně na hodnoty 5 až 10 GPa u PA, 15

GPa u PET). Kovalentní vazby mezi atomy uhlíku v páte i lineární makromolekuly by teoreticky poskytovaly modul pružnosti v tahu řádově 10^2 GPa (např. u PE s dokonale paralelními makromolekulami dostatečné délky). Vysokomodulová polymerní vlákna z PE se proto vyrábí jiným postupem.

Vychází se buď z roztok polymer nebo metodou analogickou dlužením z taveniny pomocí použití tzv. LCP (z angl. "Liquid Crystal Polymer") polymer (aromatické kopolyestery).

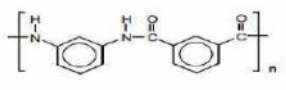
Aromatické polyamidy (aramidy, APA)

<http://en.wikipedia.org/wiki/Kevlar> <http://www.dupont.com/kevlar>



Nejnámější je Kevlar® společnosti DuPont (patent S. Kwolekové, 1965), tj. poly-para-fenyltereftalamid (para-aramid, PPTA), se strukturálním vzorcem uvedeným výše. Je dražší než vlákna skleněná (od 40 do 175 \$/kg). Hlavní výhodou je malá hustota ($\rho=1440 \text{ kg/m}^3$), velká odolnost proti abrazi a schopnost plásticky se deformovat při působení síly kolmo na osu vlákna. Levnější, méně tuhá i méně pevná vlákna jsou získána jako vlákna poly-metha-fenylizofalamidu (meta-aramid, MPIA, Nomex®) společnosti DuPont.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Nomex>

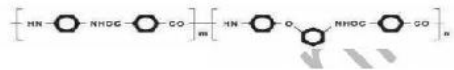


Nový produkt Nomex XF je určen pro letadla jako bariéra proti ohni.

Kevlar 49 se vyznačuje vysokou teplotou smeknutí ($520 \text{ }^\circ\text{C}$) a nevýrazným táním krystalů okolo $600 \text{ }^\circ\text{C}$ (při této teplotě již dochází k tepelné destrukci vlákna). Pro zvláknění je nutno PPTA rozpustit v koncentrované kyselině sírové. Ve 20% roztoku mají tuhé (tyinkovité) makromolekuly tendenci ukládat se paralelně a vytvářet kapalné krystaly. Při toku roztoku kapilárou dochází k paralelnímu uspořádání tyinkovitých makromolekul rovnoběžně s osou vlákna. Roztok se vytlačuje do ledové vodní lázně, v níž se kyselina vymyje. Po neutralizaci a vysušení u Kevlaru 49 následuje dlužení za tepla, které dále zvyšuje pevnost a tuhost vlákna.

Struktura vlákna je v důsledku silných mezimolekulárních sil (vodíkové můstky) výsoce krystalická (stupeň krystalinity 95%). Přítomnost nevyšacených polárních skupin N-H a C=O způsobuje navlhavost aramidových vláken. Vlhkost však nezpůsobuje příliš velký pokles mechanických vlastností. Světelné ultrafialové záření aramidová vlákna poškozuje.

Japonská společnost Teijin Group vyrábí vlákno Technora® v Holandsku od roku 2007 Teijin AramidBV® (dříve Twaron BV®). Technora má odlišné složení než para-aramid, jde o „poly(parafenylene-3,4-oxydifenyltereftalamid“.



Obchodní název japonského meta-aramidu (MPIA) je Teijin Conex®. Další obchodní značky aramidových vláken jsou Heracron® od Kolon Industries, Inc. (Jižní Korea), Kaztex® od Kazneftekhim (Kazachstan) a Altex® (Hyosung Corp, Jižní Korea).

Základní mechanické vlastnosti vybraných typů aramidových vláken uvádí tabulka spolu s údaji o vláknech Nomexu® a polyamidu 66 (Nylon®), které se však pro výrobu kompozitních dílů nepoužívají. Levnější vlákna Nomexu nedosahují mechanických vlastností Kevlaru, ale mají s ním společnou dobrou lavost a dobrou tepelnou (nevytvářejí taveninu), a chemickou odolnost. Používají se pro výrobu voštin a na nehořlavé textilie.

Charakteristickou vlastností všech polymerních vláken je, že vlákna nejsou křehká. Při působení tlakové síly ve směru kolmém na vlákno se vlákno plásticky deformuje (výroba neprůstelných vest, ochranných rukavic a oděvů). Mezkluzivní tlak je nízká, srovnatelná s hodnotami mezi kluzivními polymerami. Při náhodném působení tahové složky napjatosti v mikroobjemu kompozitu ve směru kolmém k ose vlákna dojde i k podélnému rozštěpení a fibrilaci vlákna.

Při textilním zpracování nehrozí povrchové nechráněným vláknům pokles pevnosti vzhledem k velké odolnosti aramidů proti abrazi. Krátká vlákna APA se uplatňují jako výztuž termoplastů (zvláště polyamidů) pro aplikace, kde jsou požadovány dobré kluzné vlastnosti a velká odolnost proti opotřebení.

Pro zvýšení mezifázové adheze je nutné chemické zpracování aramidových vláken, použití vazebných prostředků nebo povrchová úprava plazmatem. Při hydrolyze vláken v určitých kyselinách nebo zásadách se na jejich povrchu tvoří aminové skupiny, které mohou vázat vlákno k matici. Například reakcí butandioloového diglycidyletheru s povrchem vlákna se tvoří na povrchu vláken epoxidové postranní skupiny. Chemickým zpracováním vláken se ale povrch vláken může natolik poškodit, že při testu mezifázové adheze (např. "pull-out test") není zjištěno zlepšení soudržnosti. Jiný postup spočívá v brominaci povrchu, po kterém následuje amonolyza nebo v nitraci povrchu, po které následuje redukce. V obou případech se na povrchu vláken vytvoří aminové funkční skupiny. K povrchové úpravě aramidových vláken je možno použít i vysokofrekvenční studený plazmat. Povrchová úprava jednotlivých vláken slabým povlakem epoxidových oligomerů zajišťuje i lepší směšovitost vláken epoxidovou pryskyřicí. K dokonalejšímu prosycení tkanin pomocí i určitých procento skleněných vláken nebo přímo použitím hybridní tkaniny, v níž osnova je aramidová a útek ze skleněných vláken.

Mechanické vlastnosti n kterých typ aramidových vláken v porovnání se standardním polyamidovým vláknem PA66 (Nylon®).

	Pevnost v tahu [MPa]	Modul E [GPa]	Prodloužení [%]	Hustota [g/cm ³]
Kevlar 29	2920	71	4,0	1,44
Kevlar 49	3000	112	2,5	1,44
Kevlar 149	3450	170		1,470
Twaron 900	2800	65	4,3	1,44
Twaron 930	3000	125	2	1,45
Nomex	700	17,3	22,6	1,4
PA66	900	5	13,5	1,14

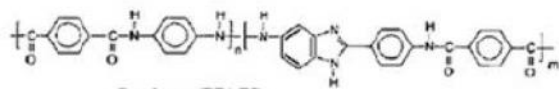
Dnes je na trhu více druh aromatických polyamid . Spole nost.DuPont používá íselné nebo písemné ozna ení jednotlivých typ Kevlaru.

Druhy PPTA od spole nosti DuPont:

Typ Kevlaru	Vlastnosti	Použití
Kevlar 29	Modul E menší než sklo	Nejvíce používané vlákno (ochranné od vy, zpevn ní elastomer , lana, náhrada asbestu)
Kevlar 49		Pevn jší než Kevlar 29, v tší modul E než sklen ná vlákna
Kevlar 149		Pevn jší než Kevlar 49, modul E=170 GPa
Kevlar 100		Barevná vlákna
Kevlar 119		Pro zpevn ní elastomer (klínové emeny, pneumatiky)
Kevlar 129		O 15 až 20 % v tší pevnost oproti Kevlaru 29 a o 30 až 35% v tší modul než u Kevlaru 29
Kevlar KM2		Pevnost až 3300 MPa. Navržen pro nepr st elné vesty a vojenské helmy
Kevlar KM2 Plus		Nové vlákno pro nepr st elné vesty a vojenské helm
Kevlar 49 AP		Nové vlákno, v tší pevnost v tahu než má Kevlar 49, zpevn ní a ochrana optických kabel

Krátká sekaná vlákna Kevlaru jsou používána v brzdách jako náhrada toxického asbestu.

Ruským prot jškem Kevlar jsou vlákna Arus®, Armos®, Rusar® a Artec®. Armos® má chemickou strukturu (považuje se též za para-aramid):

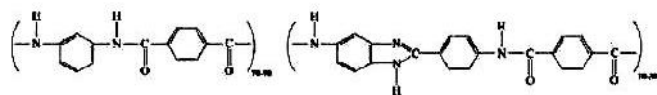


Copolymer (PTA/BI)

Pevnost Armosu (4 až 5 GPa, je též v grafu na stran 54) je v tší než Kevlaru 49

<http://www.advtech.ru/lirsot/english.htm>

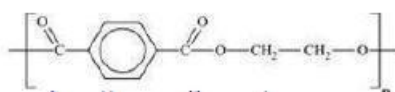
V Rusku bý též vyvinut para-metaaramid pod obchodním ozna ením Tverlana® (vyvinut v ústavu „All- Russian Scientific Research Institute of Polymeric Fibers“). Toto vlákno kombinuje velkou tepelnou odolnost para-aramidu s relativní levností meta-aramidu. Strukturní vzorec je:



Polyethyltereftalátová vlákna (PET)

<http://en.wikipedia.org/wiki/Polyethyleneterephthalate>

Jsou to vlákna azená mezi polyesterová vlákna. Chemický vzorec je



V R je jejich výrobcem Silon s. r. o. <http://www.silon.cz/>

Polyesterové tkaniny se používají na od vy, potahy nábytku apod. a vyráb jí se z nich i plachty plachetnic (Dacron®). V oblasti kompozit se používají tkané i netkané textilie z polyester na odsávací a odv trávací vrstvy p i autoklávové a VBM (“Vacuum Bag Molding”) technologii. Obcho dní zna ka Breatex™ je na webu <http://pdf.direcindustry.com/pdf/fibertex-nonwovens/breatex-nonwoven-breather-and-bleeder-fabric-for-composite-processing/4844-150477.html>, viz adresy v oddílu Matrice

Polyetherimidová vlákna (PEI)

<http://www.compositesworld.com/products/engineered-fibers-technology-announces-new-fiber-products>

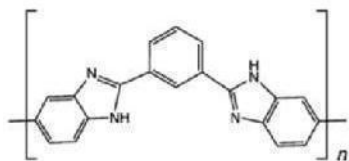
Krátká polyetherimidová vlákna od firmy Engineered Fibers Technology jsou nová vlákna, připravována zvláště ováním termoplastu Ultem. Jsou připravována jak rovná krátká (délky 0,5 až 75 mm), tak zvláště (délky 38-106 mm). Jsou nehořlavá, s velkou tepelnou odolností, nevyvíjejí kouř, mají extrémně malou navlhavost a výbornou barvitelnost. V kombinaci s dlouhými skleněnými nebo uhlíkovými vlákny jsou vhodná na výrobu kompozitních panelů letadel a jiných dopravních prostředků, pro filtraci plynů a kapalin a pro tepelnou izolaci.

Americká pobočka společnosti Kuraray vyrábí roving z termoplastu Ultem od společnosti SABIC (Saudi Basic Industries Corporation).

Polybenzimidazolová vlákna (PBI)

<http://en.wikipedia.org/wiki/Polybenzimidazolefiber>

Jsou to vlákna s velkou tepelnou a chemickou odolností. Někdy a proto také tkaniny z PBI vláken se používají pro ohnivzdorné obleky. Obchodní značka společnosti PBI Performance Products, Inc. je Celazole®. Jejich chemická struktura je:



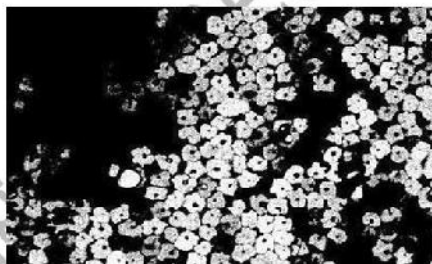
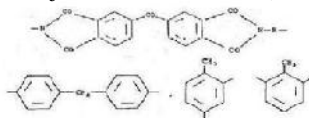
Vlákna PIB jsou i ve ruském aromatickém kopolymeru Armos

Polyimidová vlákna (PI)

<http://www.evonik.com>

Jsou odolná proti velkým teplotám i chemikáliím. Mají hustotu 1410 kg/m³. Používají se pro ochranné oděvy (jsou nehořlavé) a na filtry pro horké plyny jako náhrada za dražší aramidová vlákna, dutá vlákna jsou používána v lékařství pro výrobu separačních membrán (dobrá snášenlivost s krví).

Představitelem je například vlákno P84 firmy EvonikFibres GmbH (Rakousko). Chemická struktura ukazuje, že je to vlastně aromatický kopolymer. Skupiny R jsou ukázány na horním obrázku. Příklady z vláken je na dalším obrázku (duté vlákna).

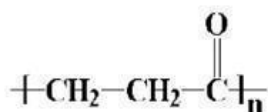


Polyketonová vlákna (POK)

<http://tiresciencetechnology.org/resource//tstcau/35i4/p317s1?isAuthorized=no>

Vlákna z alifatického polyketonu jsou používána pro zpevnění pneumatik a v dalších elastomerních produktech.

Chemická struktura je:



Vlákna z aromatických polyetherketonů (PAEK, polyaryletherketon)

<http://www.swicofi.com/zyex.html>

<http://www.zeusinc.com/extrusionservices/products/monofilament/fiberproducts.aspx>

Aromatické polyethery (je ukázána chemická struktura PEEK) mají velkou teplotu tání krystalů a dobrou odolnost proti vysokým teplotám. Odolávají kyselinám a zásadám. Oproti aramidům nenavlhají a udržují si pevnost i v prostředí horké páry. Jsou biokompatibilní a odolávají β a RTG záření.

Polyfenylsulfidová vlákna (PPS)

<http://www.evonik.com>

Jsou to vlákna s velkou tepelnou a chemickou odolností, vhodná na výrobu filtrů. Obchodní značka Procon™ vyrábí společnost Evonik. Chemická struktura je:



Vlákna UHMWPE

<http://www.etbyuedu/groups/strong/pages/articles/articles/fibers.pdf>

Velkou mechanickou pevnost mají vlákna z polyethylenu s velmi dlouhými makromolekulami, připravená zvlákněním gelu. Jejich výrobu zavedla holandská společnost DSM v roce 1985 pod obchodní značkou Dyneema®. K dispozici jsou typy SK-60 (v matcebu je pod názvem „Toyobo Dyneema“), SK-62, SK-65, SK-71, SK-75, SK-76, SK-78, SK-78 XTM, SK-90 a SK-90 XTM. Nejvyšší pevnost, v tahu o 12 až 15 % než je pevnost vláken typu SK-75 a modul v tahu o 15 až 20 % než je modul vláken typu SK-75, mají vlákna SK-90. Lana z nich vyrobená jsou nazývána Admiral. Zkratka XTM znamená „eXperimental Test Model“. Typy lan pro plachetnice mají polyesterový obal, zvyšující odolnost proti abrazi a působení UV záření. Vlákna jsou určena i pro protibalistickou ochranu (SB znamená „Soft Ballistic“, HB znamená „Hard Ballistic“ (například HB2)). Americká společnost Honeywell Advanced Fibers and Composites vyrábí UHMWPE vlákna s obchodní značkou Spectra® (Spectra 900, 1000, 2000, 3000 a panely SpectraShield™ (SR, SA pro mechanickou i tvrdou protibalistickou ochranu).

Japonská firma Mitsui Petrochemical Ind. vyrábí Tekmilon®. Další obchodní názvy jsou Tivar® (Quadrant PP, USA), Polystone-M® (Röchling Engineering Plastics, Německo), Tensylon® (Integrated Textile Systems, USA), Gardur® (Garland Manufacturing, USA) a Certran® (Hoechst Celanese, USA).

Ohebné makromolekuly lineárního polyethylenu mají kovalentní vazby mezi uhlíky uloženy v rovině (planární, tzv. „cik-cak“ uspořádání). „Pružnost“ kovalentních vazeb při dokonalé orientaci makromolekul ve směru osy vlákna poskytovala vláknu modul pružnosti v tahu až 250 GPa. V kompaktním PE s velkou molekulovou hmotností (řádově 10⁶) jsou však makromolekuly skládány v lamelách nebo neuspořádaně propleteny v amorfním podílu. Při dloužení z taveniny je orientace makromolekul omezena vlivem velké hustoty fyzikální sítě (zapletení) na přirozený dlouhící poměr okolo 5 (dlouhící poměr je dán poměrem délky vydlouženého vlákna k původní délce materiálu). Pro dosažení vysoké pevnosti i tuhosti vlákna je nutno tento poměr zvýšit nad hodnotu 70. Proto je nutno rozpustit UHMWPE v některé rozpustné látce (parafinový olej, dekalín, zahřátý parafinový vosk). V roztoku obsahujícím 5 až 10 % polymeru jsou jednotlivé makromolekuly separovány rozpouštědlem, snadno se „rozplétají“ a při toku kapilárou (tryskou) se paralelně uspořádávají. Vlastní tvorba vlákna probíhá při teplotě roztoku 135°C. Souasně probíhající procesy krystalizace a opětovného rozpouštění krystalů poskytují roztoku charakter gelu-proto termín „zvláknění gelu“. Vzniká porézní vlákno, které se dále za tepla dlouží.

Kromě malé hustoty (ρ=970 kg/m³, PE plave na vodě) je velkou výhodou UHMWPE též velká korozní odolnost. Nepolárnost polymeru a i složité uhlíkové skelet-makromolekuly zaručují při normální teplotě odolnost vůči většině chemikálií, s výjimkou silných oxidů a rozpouštědél (například koncentrované kyseliny dusičné a hydroxid sodný), které vlákno slabě narušují. Na rozdíl od aramidů UHMWPE vlákno nepřijímá vlhkost a je více odolné proti světelnému UV záření. Houževnatost a odolnost UHMWPE proti otředu je podobná jako u aramidových vláken.

Hlavní nevýhodou UHMWPE vláken je jejich malá tepelná odolnost. Teplota tání krystalů PE se orientací makromolekul příliš nezvyšuje (je okolo 135 °C). Chemická netečnost vláken zvyšuje nároky na jejich povrchovou úpravu pro zajištění dobré soudržnosti s polymerními matricemi. Bez povrchové úpravy je smyková pevnost rozhraní vlákna a například epoxidové matrice na minimální úrovni (asi 0,8 MPa). Zatímco aramidová vlákna je možno například leptat, u PE je perspektivní pouze úprava vysokofrekvenčním plazmatem s použitím argonu a přidáváním nízkomolekulárních sloučenin (například allylaminy). Po optimálním režimu plasmatické úpravy u UHMWPE vláken bylo pozorováno například zvýšení smykové pevnosti rozhraní.

Použití vláken UHMWPE v protibalistických aplikacích je velmi výhodné. Nejmenší například neprostupné vesty mají lepší schopnost zastavit letící kulku než vesty z Kevlaru, ale vesty mohou být tenčí, poddajné a lehčí. Vesty nejsou vyrobeny z tkaniny ale z jednosměrných („UniDirectional“) uspořádaných vláken, kdy každá následující vrstva je kolmá na předchozí.

Mechanické vlastnosti některých vyráběných typů UHMWPE vláken v porovnání s běžnými PET a PA66 vlákny uvádí následující tabulka.

	Pevnost v tahu [MPa]	Mechanická pevnost [N/tex]	Modul pružnosti [GPa]	Mechanický modul [N/tex]	Prodloužení při přetržení [%]	Hustota [kg/m ³]
Spectra 1000	3000	3	172	100	3,9	970
Spectra 3000	3650	3,76	175	180,4	3,1	970
Dyneema SK-75	3400	3,5	113	116		970
Dyneema SK-90	4000	4	130	132		970
PET	1100	0,797	14	10,14	13	1380
PA66	90	0,789	5	9,385	13,5	1140

Vlákna HMPP (vysokomodulová vlákna polypropylenu)

<http://en.wikipedia.org/wiki/InnegraS>

Firma Innegrit, Inc. (USA) v roce 2006 začala vyrábět polypropylenová vlákna Innegra™ s dobrou tuhostí a pevností (vlákna Innegra™ S a Innegra™ E).

). Oproti sklen ným vlákn m mají mnohem menší hustotu (840 kg/m^3) a lepší dielektrické vlastnosti (relativní permitivitu 2,2 a ztrátový initel (tangens ztrátového úhlu) 0,0002 p i 1 MHz (zvlášt vlákna Innegra™ E)) a lepší chemickou odolnost. Nové vlákno Innegra H je vhodné pro p ípravu sm ných tkanin v kombinaci s ostatními výkonnými vlákny (tj. uhlíkovými, aramidovými a dalšími). PP bude tvo it matrici vylišovaného kompozitního dílu.

Mechanické vlastnosti vláken Innegra™ S.

Pevnost v tahu [MPa]	Modul E [GPa]
90	18

Spolu se sklen nými vlákny mohou být tato vlákna používána pro lamináty kryt radar letadel a lodí a na desky plošných spoj pro vysoké frekvence. Protože houževnatost vlákn a Innegra™ je stejná jako u Kevlaru, další potenciální aplikací je výroba lehké protibalistické ochrany

Vlákna z termotropních aromatických kopolyester (LCP, "Liquid Crystal Polymer")

<http://www.napedu/openbook.php?recordid=1623&page=49>

U samovyztužujících se plast p i toku taveniny v oblastech s velkým gradientem smykových rychlostí (tj. p edevším v povrchových vrstvách proudu) dochází k orientaci tuhých makromolekul ve sm ru toku. Stejný postup lze uplatnit i p i výrob vláken. Teplota tání krystal se pohybuje okolo 300°C , tavenina má dostate n malou viskozitu, takže vlákno lze vyřáb t zvlášt ováním taveniny tj. jde o termotropní proces.

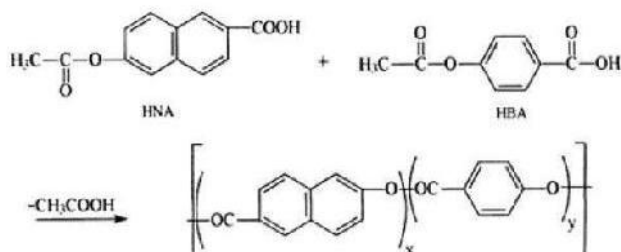
Špi ková LCP vlákna jsou vytvo ena z aromatických polyester Stavba LCP vláken p ipomíná biologická vlákna, z nichž jsou složeny například šlachy Pro konstruk ní aplikace mají tato vlákna velkou tepelnou odolnost a p irozenou afinitu k polymerním matricím. Oproti aramid m jsou LCP vlákna nenavlhavá.

Nejnov jší Vectran EX je ur en pro vysokoteplotní aplikace.

Základní charakteristiky vlákna Vectran®

	Pevnost v tahu [GPa]	Modul pružnosti [GPa]
Vectran HS	32	23
Vectran NT	11	52
Vectran UM	3	215
Vectran EX	?	?

Chemický struktur ní vzorec vlákna Vectran® <http://en.wikipedia.org/wiki/Vectran> společ nosti Kuraray America, Inc.

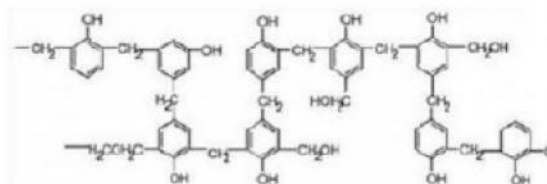


Vlákna na fenol-aldehydové bázi

<http://www.kynol.com/>

Fenol-aldehydové vlákno Kynol® (Nippon Kynol, Inc., American Kynol, Inc. Kynol Europa GmbH) je díky své struktu e netavitelné a neho lavé (ochranné pom cky), m že být použito jako náhrada asbestu pro brzdy a jako prekursore uhlíkových vláken (viz novoloidová uhlíková vlákna) na stránce 21.

Chemická struktura Kynolu® je:



Vlákno je i vysoce chemicky odolné, protože je tvo eno t íroznm zesít ným polymerem podobným fenolické pryskyici. Vlastnosti vlákna jsou uvedeny v tabulce

Barva	zlatá
Pr m r [μm]	14-33
Hustota [g/cm^3]	1,27
Pevnost v tahu [MPa]	1300-1800
Modul pružnosti v tahu [GPa]	350-450
Prodloužení p i p etržení [%]	30-60
Navlhavost p i 20°C a 65% RH [%]	6

Z vláken Kynolu je vyřáb n také roving, který je po zuhel at ní vhodný pro výrobu kompozit uhlík-uhlík (uhlíková vlákna, uhlíková

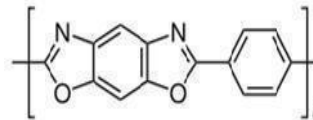
matrice).

Vlákna PBO

<http://en.wikipedia.org/wiki/Zylon>

Jde o poly(*p*-phenylene-2,6-benzobisoxazol, zkrácen polybenzobisoxazol.

Tato vlákna jsou tvořena tuhými žebříkovitými makromolekulami ("ladder polymer").



Vlákna PBO začala v roce 1998 dodávat firma Toyobo (Japonsko) s názvem Zylon® (vyslovuj „zajlon“). Jejich vlastnosti jsou uvedeny v následující tabulce (AS- "Average Strength", HM- "High Modulus").

	Zylon AS	Zylon HM
Hustota [kg/m ³]	1540	1560
Pevnost v tahu [GPa]	5,8	5,8
Modul pružnosti v tahu [GPa]	180	280
Prodloužení při proužení [%]	3,5	2,5
Navlhavost [%]	2	0,6
Teplota rozkladu [°C]	650	650
Součinitel délkové teplotní roztažnosti [1/K]		-6*10 ⁻⁶
Relativní permitivita při 100 kHz		3
Ztrátový součinitel		0,001

Svou tuhostí vlákna PBO převyšují aramidová vlákna. Modul pružnosti v tahu mají zhruba dvojnásobný (teoreticky až 480 GPa) oproti nejtužším vláknům aromatických polyamidů, neovlhlají, a při vystavení ohni nemění tvar (PBO se chová jako ablativní materiál, odpařuje se), v ohni vykazuje malý vývin kouř a má výbornou odolnost proti abrazi. Cenově jsou PBO vlákna dražší než standardní uhlíková a aramidová vlákna. Výroba nepřestavěla, ale byla zakázána, protože starší vesty nezajistily nezranitelnost jejich nositelů (při používání probíhá rychlá chemická degradace polymeru (vlivem hydrolyzy i vlivem působení UV složky světelného záření)).

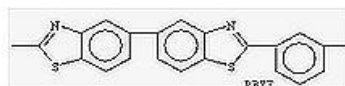
http://www.bsst.de/content/PDF/050.08120002_EN.pdf

PBO vlákna se mohou stát precursorem uhlíkových vláken, protože jejich chování při karbonizaci je podobné chování PAN. Oproti precursoru PAN nevyžadují oxidační stabilizaci a jejich struktura je podobná vláknům z mesofázových smol, v nichž nemají krystaly radiální uspořádání.

<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=4133339>

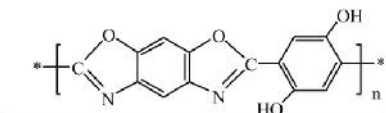
Vlákna PBZT poly-*p*-phenylene benzobisthiazole

<http://www.che.uc.edu/jmark/PhD%20Dissertations/DANG-THESIS-Final0509.pdf>



Vlákna PBOH poly[*p*-(2,5-dihydroxy)-phenylenebenzobisoxazole

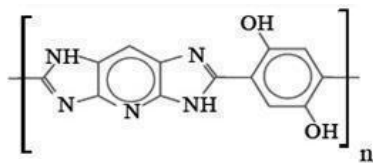
Vlákna mají menší pevnost v tahu než PBO vlákna a což je teplotní odolnosti, tak je také nepřesahují, ale oproti nim mají větší axiální pevnost v tlaku (331 MPa). Pevnost v tahu je 6 GPa, modul pružnosti v tahu 155 GPa.



Vlákno M5 (PIPD)

<http://web.mit.edu/course/3/3.91/www/slides/cunniff.pdf>

Jde o výrobek firem Magellan Systems International a DuPont Advanced Fiber Systems. Vlákno bylo vyvinuto ve spolupráci s Akzo Nobel. Chemická struktura je



Je to poly[2,6-diimidazo[4,5-b:4',5'-E]pyridinylene-1,4-(2,5-dihydroxy)fenylen.

Silné mezimolekulární síly (prostorové vodíkové vazby) a vysoká tuhost makromolekuly dávají tomuto vláknu výjimečné vlastnosti – vlákna mají velmi vysokou pevnost v tahu, v téže modul pružnosti než nízkomodulová uhlíková vlákna z PAN a také stejným modulem (hustota 1700 kg/m³) jako všechna nízkomodulová uhlíková vlákna a PBO vlákna. Důležitá je také velká adheze k pryskyřicím (pro epoxidovou pryskyřici DER353 je IFSS (“Interfacial Shear Strength”) 59 MPa oproti 28 MPa u Kevlaru KM2).

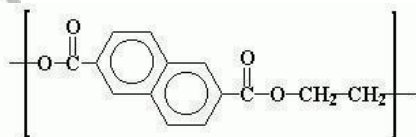
Vlastnosti vlákna M5 jsou uvedeny v následující tabulce.

	M5 dosahované hodnoty	M5 cíl
Pevnost v tahu [GPa]	8,5	9,5
Prodloužení při prasknutí [%]	2,5	2,5
Modul pružnosti v tahu [GPa]	300	450
Hustota [kg/m ³]	1700	1700
Počet teplotní degradace na vzduchu [°C]	530	530
Navlhavost [%]	2	2

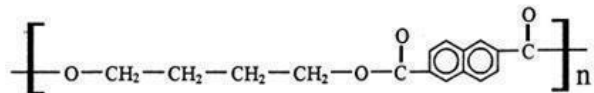
Obecně lze říci, že polymerní vlákna se uplatňují v následujících oblastech: protibalistická ochrana (neprostupné vesty, vesty z vláken M5 mají menší hmotnost (o 40 až 50% oproti vestám z Kevlaru)), ochranné oděvy proti ohni, pro konstrukční kompozity, kompozity pro redukci „viditelnosti“ letadel a na lana a tkaniny.

Vlákna z polyesteru naftalátového typu, polyethylen-naftalát (PEN) a polybutylen-naftalát (PBN)

Chemická struktura PEN (“poly(ethylen-2,6-naphthalate)”) je



PBN (“poly(butylen-2,6-naphthalate)”) má strukturu:



PEN tuhostí a pevností patří k klasickým polymerním vláknům polyamidová a polyesterová (PA6, PA66, PET). Pro lamináty však tato vlákna nejsou vhodná, protože jejich modul pružnosti E (maximálně 30 GPa) je zhruba polovina než modul skleněných vláken. Je však možná jejich kombinace s tvrdšími vlákny (například uhlíkovými). Jsou levnější náhradou aramidových, PBO a PPD vláken pro výztuž pneumatik (výzkum Allied Signal, Inc.), klínových členů a pro plachty plachetnic.

PBN vlákna jsou poddajnější než vlákna PEN díky většímu podílu skupin CH₂ a v kombinaci s PET vlákny (“bicomponent polyester fiber”) se používají na jemné tkaniny stříbrné barvy (filtry, absorpční materiály pro medicínu, materiály na čištění).

Tkaniny z PEN vláken vyrábí společnost Honeywell Performance Fibers Fabrics, Honeywell International, Inc. pod obchodní značkou Pentex®.

PEN vlákna obchodní značkou Teonex® vyrábí japonská společnost Teijin a u mezinárodní společnosti Performance Fibers jsou vlákna označena jako PenTec™. <http://rtm.marine-technology.org/presentation/pdf>

EDI OVÁ VLÁKNA

<http://www.basfiber.com/>

Jde o vlákna s vlastnostmi podobnými skleněným vláknům typu S. Výhodou je jejich cena, která činí asi 60 % skleněných S vláken a dobrá chemická odolnost. Výroba je analogická výrobě skleněných vláken, teplota tavení je 1450 °C.

Složení edie i technologie používaná v USA odpovídá podmínkám v ruských a ukrajinských závodech, v nichž výroba zala b hem studené

války (vlákna nahrazovala sklená vlákna typu S v leteckých aplikacích). ediová vlákna mají ve srovnání se sklenými vlákny typu E odlišné složení a vlastnosti.

Porovnání složení ediových a sklených E vláken

Chemické složení	edi [hm. %]	E-sklo [hm. %]
SiO ₂	58	55
Al ₂ O ₃	17	15
Fe ₂ O ₃	10	0,3
CaO	8	18
MgO	4	3
Na ₂ O	2,5	0,8
TiO ₂	1,1	-
K ₂ O	0,9	0,2
B ₂ O ₃	-	7
F	-	0,3

Porovnání vlastností ediových a sklených vláken

	ediové vlákno	Vlákno z E skla
Pracovní teplota pro tepelné izolace [°C]	820	60
Minimální teplota použití [°C]	-260	-
Teplota tavení [°C]	1450	140
Teplota skelného p echodu [°C]	1050	82
Hustota [kg/m ³]	2750	2
Pevnost v tahu [MPa]	4840	3450
Modul pružnosti E [GPa]	89	77
Prodloužení p i p etržení [%]	3,15	4,7
Sou initel délkové teplotní roztažnosti [10 ⁻⁶ 1/K]	5,5	5
Chemická odolnost - úbytek hmotnosti za 3 hod [%] va ící voda/va ící NaOH	0,2/5	0,7/6

PROTEINOVÁ VLÁKNA (VLÁKNA PAVOU Í)

<http://en.wikipedia.org/wiki/Darwin%26barkspider>

Vlákna pavouk vynikají velkou houževnatostí (mají velké pomrné prodloužení p i p etržení, až o ád v tší než vlákna Kevlaru[®] 49), ale nejsou v pot ebém množství dostupná bez genetického inženýrství. Pavouci se nedají hromadn chovat jako bourec morušový, protože jsou agresivní a pot ebují ovládat své teritorium.

Transplantací žlázových gen pavouk do mléčných žláz koz bylo dosaženo, že v mléku byly p ítomny pot ebné proteiny Vlákenný produkt společnosti Nexia Biotechnologies ml obchodní zna ku BioSteel[®]. V roce 2009 společnost u lala úpadek. Na universit Utah State University ("Utah Science Technology and Research Initiative" (USTAR)) <http://en.wikipedia.org/wiki/BioSteel> vyvinutou technologii i nadále používají. Ve výb hu university za tím ú elem chovají stádo 30 transgenních koz.

Také transgenní formy larev bource morušového dávají hedvábná vlákna s vlastnostmi pavou ích vláken. Výzkum se provádí na University of Notre Dame a University of Wyoming. Společnost Kraig Biocraft Laboratories, Inc. <http://www.kraiglabs.com/> vlákna komer n vyrábí.

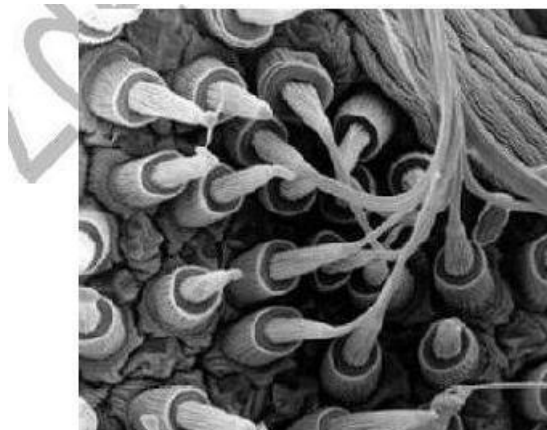
Um lá proteinová vlákna se dají také vyráb t pomocí metabolicky upravených bakterií EscherichiaColi, které fungují jako hostitelé produkce pot ebných aminokyselin. <http://www.sciencedaily.com/releases/2010/07/100727121940.htm>

Proteinová pavou í vlákna jsou biodegradabilní a jsou proto vhodná pro r b á ské vlasce a pro chirurgii jako šicí vlákna. P i použití na protibalistickou výzbroj je výhodou jak nižší cena vláken, než mají vhodná syntetická vlákna, tak malá hustota 1320 kg/m³).

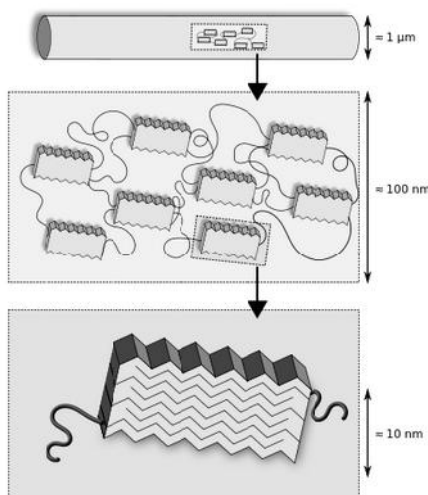
Druh	Hustota [g/cm ³]	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [GPa]	Prodloužení při p etržení [%]	Spotřebovaná gr [MJ/m ³]
Mágggerská pavouk -Ctenopsis darwini Růrov pavouk, viz odraz pod názevem kapitoly	1,32	13	1,85	13	400
Pavouk -Argiope trifasciata*	1,32	10	1,2	30	180
Pavouk -Nephila clavipes*	1,32	13	0,7-1,2	18-27	130
Hedvábní bource morušového	1,3	5	0,6	18,5	50
PA66 (Nylon [®])	1,14	2,4	0,9	37	80
UHMWPE Dyneema [®] SK-75	0,97	110	3,4	3,3	
UHMWPE Dyneema [®] SK-90	0,97	130	4		
PPFA Kevlar [®] 49	1,44	130	3,4	3	5
PBO Zylon [®]	1,6	270	5,8	3	7
PPID MS [®]	1,7	350	8,5	1,4	

Z tabulky je zřejmé že pavoučí vlákno nemůže pevností ani modulem pružnosti konkurovat syntaticky vyrobeným polymerním vláknem UHMWPE (Dyneema[®] Spectra[®]), PPTA (Kevlar[®]), PBO (Zylon[®]) a PIPD (M5[®]), viz graf na straně 54. V porovnání s polymerním vláknem Nylon[®] je pevnější, Nylon má zato větší poměrné prodloužení při přetržení.

Pavoučí vlákno je složeno z dvou hlavních aminokyselin - z alaninu (25 %) a glycinu (42 %). Zbývající složky jsou aminokyseliny glutamin, serin, leucin, valin, prolin, tyrosin a arginin. Alanin vytváří krystalické oblasti ("β-pleated sheet"), mezi kterými je nekystalický glycin. Pevnost a nenavlhavost (hydrofobnost) vlákna určuje krystalický podíl, velké prodloužení při přetržení zajišťuje amorfní podíl. Vytlačování vláken pavouka, popř. z něj vyrobených vláken pomocí SEM ("Scanning Electron Microscopy") je na prvním obrázku. Struktura vlákna je znázorněna na druhém obrázku.



<http://science.howstuffworks.com/zoology/insects-arachnids/spider3.htm>



Další se také pokusy s výrobou pavoučích vláken pomocí infikování kultur buněk housenek *Spodoptera frugiperda* virem (baculovirus). Infikované kultury buněk potom produkuje proteiny, jaké se nacházejí v pavoučích vlákních. Výzkum se také provádí na Arizona State University (ASU).

<http://www.sciencedaily.com/releases/2013/01/130128104741.htm>

Vylepšením technologie spinování proteinových vláken je použití elektrostatického pole, tj. jedná se o elektrostatické spinování. Získaná vlákna jsou nanovlákna (průměry vláken jsou v nm).

Přidáním vysoce pevných uhlíkových nanotrubiček (CNT, "Carbon Nano Tube") do roztoku, z kterého je vlákno vyrobeno, se získá nanovlákno s velkými mechanickými vlastnostmi.

Mechanické vlastnosti vláken pavouků s CNT uvádí následující tabulka.

	Modul pružnosti v tahu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Prodloužení při přetržení [%]
Vlákno MaSp 1	123,3	9,56	14,3
Vlákno MaSp 1 + 1% CNT	1004,4	40,7	7,4

MaSp 1 je protein "Major Ampullate Spidroin 1"

Pevnější a houževnatější vlákna pavouků se získávají také infiltrací ionty kovů (titanu, hliníku a zinku) metodou ALD ("Atomic Layer Deposition"). Pevnost vzroste 10x s Ti, 9x s Al a 5x se Zn.

<http://www.cosmosmagazine.com/news/274/super-strength-spider-silk-created>

<http://www.azonano.com/news.asp?newsID=11112>

http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_layer_deposition

PŘÍRODNÍ VLÁKNA Z ROSTLIN

Organická přírodní vlákna jsou získávána ze stonkových rostlin. Hodnoty hustoty, pevnosti, tuhosti a poměru prodloužení při přetržení uvádí následující tabulka.

Vlákna	Hustota [g/cm ³]	Pevnost v tahu [GPa]	Modul pružnosti E [GPa]	Mezní prodloužení při přetržení [%]
Celulózová vlákna Greenlite™	1,5	0,675	35	6,2
Juta ("Jute"), (<i>Corchorus</i>)	1,3-1,5	0,183-0,773	30-55	1,4-3,1
Konopí ("Hemp"), (<i>Cannabis Sativa</i>)	1,4-1,5	0,58-1,10	30-90	1,3-4,7

Sisal (vlákna z list Agave sisalana)	1,33	0,507-0,855	9-28	2-3
Henequen (vlákna z list Agave fourcroydes)	1,49	0,43,0,580	10,1-16,3,	2,4
Len ("Flax"), Linum usitatissimum	1,53	0,8-1,795 (velkou pevnost mají francouzské kultivary Hermès a Suzanne) *	40-85 dle kultivaru	1,1-1,5 dle kultivaru
Kenaf (Hibiscus cannabinus)	1,45	0,33-0,93	22-53	3,7-6,9
Kokosové o echy ("Coir"), vlákna plod	0,7-1	0,106-0,27	37	30-40
Ramie (Bohemia nivea)	1,5	0,4-0,838	62-128	1,2-3,8
Abaka vlákna z listu banánovníku textilního (Manilské konopí, Musa textilis)	1,32	0,187-0,773	72	10-12
Kapok, vlákna plod stromu Ceiba pentandra	0,29	0,69	24,8	1,8-4,2
Bavlna (Gossypium)	1,5-1,6	0,287-0,597	5,5-12,8	3-10
Kop iva dvoudomá (Urtica dioica), vlákno žahavé kop ivy	2,11	1,59 **	87	2,11
Bambusové vlákno (Bamboo)	1,5	0,3-0,34	16,2	23,8

* Údaj o lnu Hermès viz <http://www.jeccomposites.com/news/composites-news/high-performance-natural-fibres>

** Údaj o zna n velké pevnosti vlákna kop ivy dvoudomé byl p evzat z http://extra.ivf.se/eccm13_programme/abstracts/203.pdf

Udaje o francouzských odr dach lnu viz práce F. Desting a kol. Comparison of Morphological and Mechanical Properties of Seven Varieties of Flax Fibres, p ednesené na 18th International Conference on Composite Materials.

Len jako výztuž má obchodní zna ku Biotex. <http://www.compositesevolution.com/Product/Biotex/BiotexFlax.aspx>
Firma Amber Composites vyrábí Multipreg 8020 s výtuží lnu Biotex.

Krom uvedených rostlin se používá cukrová t tina (Saccharum officinarum), ananas, Curauá (Ananas erectifloius), Isora (Helicteres isora), Sansevieria cylindrica (ele Agavaceae), Piassava (Attalea funifera), Bagasse (Sugercane) a další,

P írodní vlákna jsou používána pro výztuž díl osobních automobil . Následující obrázek ukazuje použití t chto díl u Mercedesu 5. Pro zlepšení adheze vlákna a matrice jsou nap íklad vlákna lnu povrchov upravována estery nebo ethery.



NFRP znamená "Natural Fiber Reinforced Plastics"). Jsou-li použita vlákna celulózy, jde o tzv. WPC ("Wood Plastic Composites"). Pro lepší soudržnost vláken s v tšinou nepolární matricí je nutné nepolární matrici modifikovat polární složkou, u polypropylenu obvykle maleinanhydridem.

Použití rostlinných vláken v termoplastech p ínají tyto výhody:

- jedná se o levnou výztuž s malou hustotou
- dochází k úspo e polymeru
- použitím výztuže z p írodních vláken klesne cena výrobku.
- je možno zkrátit výrobní cyklus (kompozit má v tší tepelnou vodivost než samotný plast)
- odpad je recyklovatelný
- výztuž je biodegradabilní
- povrch výrobku má p írodní vzhled
- vlákna nezp sobují opot ebení ínných díl zpracovatelských stroj (šnek , tavné komory a formy)

Vlastnosti PP kompozitu s p írodními vlákny

P írodní vlákno	w _f [%]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
Juta	5	73	8,5
Sisal	5	60	6,0
D evo smrkové	5	39	5,5
istý PP	0	32	1,7

Vlastnosti PEHD kompozitu s p írodními vlákny

P írodní vlákno	w _f [%]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
Juta	5	26	3,0
Sisal	5	21	2,1
D evo smrkové	5	14	2,0
istý PEHD	0	0,12	0,12

V Mississippi State University vyvinuli metodu zpevnění vláken kenafu nano částicemi CaCO₃. Jde o vlákno z hibiscus cannabinus - ibišku konopovitého. Nano částice vykrystalizují z roztoku CaCl₂ a Na₂CO₃ v mikropórech vlákna. Kompozity s vlákny kenafu mají polypropylenovou matici nebo matici na bázi bioplastu z polymlé né kyseliny (polylaktid, PLA), která je též termoplastická.

Společnost Procotex SA (Belgie) <http://www.compositesworld.com/products/low-density-flax-fiber-prepregs> vyrábí jednomn é prepregy s p írodními vlákny. Tyto tzv. „eko-kompozity“ s reaktoplastickou nebo termoplastickou maticí mají menší hustotu než kompozity se sklen ěnými vlákny, mají vysoké tlumení vibrací, velkou odolnost proti abrazi a jsou recyklovatelné. Jsou používána vlákna lnu, kenafu, juty, sisalu a kokosu. Firma se zabývá též recyklací textilních vláken, např. vláken polypropylénu použitého na kobereky a zvukové izolace automobilů.

Závod v USA pro produkci kompozit vyztužených dřevem a p írodními vlákny je Polymera, Inc. <http://www.polymera.com/>

Mezinárodní společnost Porcher Industries <http://www.porcher-ind.com> uvedla na trh vlákna z celulózy Greenlite™, jejichž p edností je oproti sklen ěným vláknam malá hustota. Vlákna jsou používána i k výrob ě tkanin, které jsou snadno impregnovatelné standardními procesy, mají dobrý vzhled v porovnání s tkaninami z jiných p írodních vláken a dovolují snadnou manipulaci a z ezení. Vlákna jsou biodegradabilní a mají dobrou kompatibilitu s bio-prysky icemi.

Firma Gordon Shank Consulting LLC (Kanada) uvedla na trh celulózová vlákna BioMid™ <http://biomidfiber.com/>. Jsou vyráb ěna v Jižní Koreji. Jsou krystalická (95 %), ve zvlh ěném stavu jsou transparentní, hustotu mají jako APA, modul pružnosti jako sklen ěná vlákna E a teplotní odolnost do 200 °C.

Společnost Faurecia (Francie) <http://www.faur ecia.com/Pages/Default.aspx> dodává pro automobily termoplastické kompozitní desky s dřev ěnými vlákny Lignoflex®, určené k lisování automobilových dílů (automobilové sedačky a výplně dveří).

Společnost BASF vyrábí pro automobilový průmysl kompozity s reaktivní akrylátovou maticí Acrodur® (jde o vztvrditelnou vodnou disperzi), která je vyztužena p edevším rostlinnými vlákny a n které typy i netkanou sklen ěnou nebo polyesterovou vyztuží. http://www.basf.com/group/corporate/en_G/literature-document/Sales+Products+Acrodur+950+L-Brochure-Acrodur+Ecotechnology+by+BASF-English.pdf

Společnost Cereplast, Inc. v USA je zam ěna na bioplasty.

Společnost Bo-NaFaTec GmbH & Co. KG Natuřfasertechnologie

<http://www.bonafatec.com/eng/produkte01.htm>

produkuje rohože z rostlinných vláken, zabudované v termoplastické matici (pro automobilový průmysl, Obchodní značky jsou: Lignoflex™, Lignoprop-PES®, Boflex+®, Bo-NaFaFlex®, Bo-NaFaPlate®.

Další společnosti specializované na použití p írodních vláken na kompozity pro automobilový průmysl je:

<http://greencorenc.com/index.htm> (Kanada).

P ÍRODNÍ JÁDRO SENDVIČ -BALZA

http://en.wikipedia.org/wiki/ochroma_pyramidale

Balza je velký (až 30 m), rychle rostoucí strom. Roste v Jižní Americe, 95 % komerční produkce pochází z Ekvádoru. Struktura dřeva se vyznačuje velkými bukami, které jsou vyplněny vodou. Střeny buněk jsou tvořeny vlákny celulózy a hemicelulózy v ligninové maticí (lignin má tvořivou strukturu, nejedná se o lineární polymer). Tento p írodní kompozit má hustotu 40 až 340 kg/m³ (obvykle 160 kg/m³). Balzové dřevěno má, jen pomalu doutná. Oproti polymerním průmům teplem nemkne a vyznačuje se menší tepelnou vodivostí. Oproti voštinám (“honeycomb”) jsou bučky uzavřené, takže např. klad sendvičové panely (viz Historie (torpédoborec Zumwalt)) lze vyrábět technikou infuze prysky ice.

P ÍRODNÍ MINERÁLNÍ VLÁKNA

<http://en.wikipedia.org/wiki/Asbestos>

<http://www.youtube.com/watch?v=2lj3qX3ayZM&feature=endscreen&NR=1>

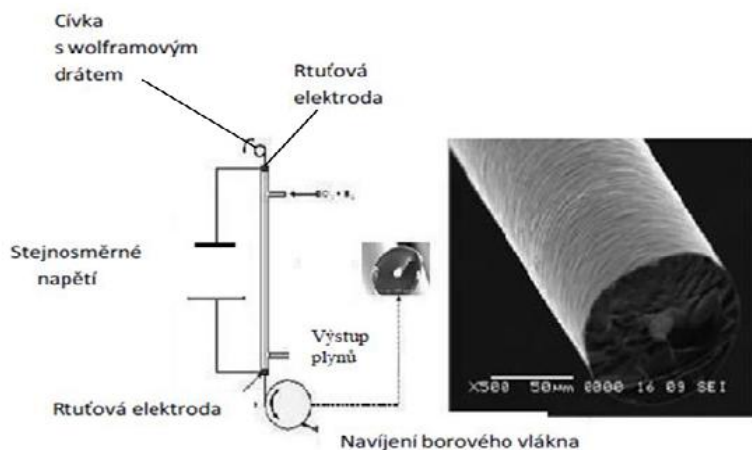
Jsou pouze krátká (diskontinuální). Vlákná chrysotilu (serpentin, bílý azbest) jsou zvláště ohavná a mají tendenci tvořit shluky. Chrysotil má vzorec $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$, hustotu $2,56 \text{ g/cm}^3$, modul $E=160 \text{ GPa}$ a pevnost v tahu $3,1 \text{ GPa}$. Zbývajících pět typů azbestu (krokidolit, antofylit, tremolit, aktinolit, amosit) jsou tzv. amphiboly a mají vlákná hladká, se špičatými konci. Ze zdravotního hlediska jsou nebezpečnější než vlákná chrysotilu.

Všechny typy azbestu jsou však již několik desetiletí ze zdravotních důvodů vyloučeny z používání vzhledem k prokázané karcinogenitě úlomků vláken. Výjimkou je jejich použití ve stavebnictví jako výztuže litého betonu, kde jsou vlákna izolována od okolí.

VLÁKNA PRO VYSOKOTELOTNÍ APLIKACE

Borová vlákna

Jsou nyní vyráběna především v USA (firma Specialty Materials, Inc). Výroba metodou CVD ("Chemical Vapor Deposition") způsobuje jejich vysokou cenu (současná nejmenší cena je asi $300 \text{ \$/kg}$, dříve až $700 \text{ \$/kg}$). Pro kompozity s kovovými maticemi nejsou neupravená borová vlákna vhodná, protože jejich povrch reaguje s kovy. Borová vlákna se proto upravují nanosením tenké vrstvy SiC (vlákna Borsic[®] nebo BC). Borová vlákna byla první vlákna, která při pevnosti v tahu $3,45 \text{ GPa}$, hustotou $2,5 \text{ g/cm}^3$ dosahovala modulu pružnosti 400 GPa . Nyní mají pevnost $3660\text{--}4000 \text{ MPa}$, modul 400 GPa a hustotu 2380 g/cm^3 . Oproti ostatním vláknům mají borová vlákna velký průměr (10^2 \mu m) a mají v tísni tvarovou stabilitu při tlakovém namáhání. Jejich pevnost v tlaku (okolo $6,9 \text{ GPa}$) je větší než pevnost v tahu. Technologie CVD, spočívající v kondenzaci plynného boru na vláknovém substrátu, je málo produktivní. Do horní části vertikálního reaktoru se přidává chlorid boritý. Při teplotách kolem $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ se BCl_3 rozkládá na plynný bor a páry HCl . Wolframový drát o průměru 12 \mu m se zahřívá proudem (drát pochází z rurovými elektrodami). <http://specmaterials.com/boronfiber.htm> Dříve se používalo pouze wolframové vlákno, nyní také levnější uhlíkové vlákno, připravené z izotropní smoly. Borová vlákna se v tísni dodávají v podobě jednosměrného prepregu s epoxidovou maticí (výrobce Specialty Materials, Inc). Tkaniny z borových vláken nelze vyrobit, jako náhrada je dodáván materiál, v němž borová vlákna jsou vázána polyesterovou přízí. Dispozice je také HyBor[®], hybridní C/B prepreg obsahující jak uhlíková, tak borová vlákna (výrobce Specialty Materials, Inc). Prepregy jsou hodnoceny podle počtu borových vláken na jeden palec ("inch"). Prepregy HyBor[®] se 100 vláknými inch stojí $660 \text{ \$/kg}$, prepreg HyBor[®] s 208 vláknými inch je za $1200 \text{ \$/kg}$. Hlavní oblastí aplikace je zesílení (zpevnění) konstrukcí tlakem namáhaných prvků, výroba dílů s velmi malou tepelnou roztažností a malou roztažností, způsobenou vlhkostí.



Keramická vlákna

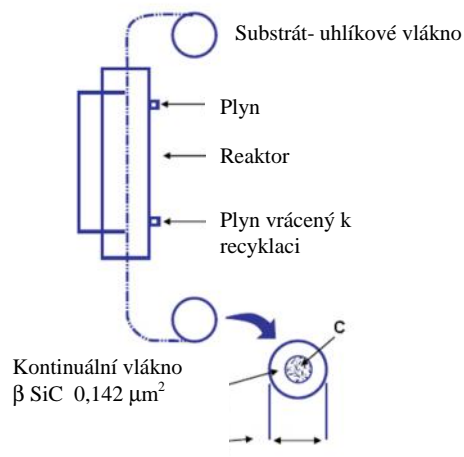
<http://www.napedu/openbookphp?recordid=6042&page=6>

Oproti uhlíkovým a polymerním vláknům mají keramická vlákna v tísni hustotu (průměrně okolo 3 g/cm^3 u Al_2O_3 vláken, $2,5 \text{ g/cm}^3$ u SiC vláken).

Jejich hlavní předností je jejich výborná tepelná a velmi dobrá chemická odolnost. Dělí se na oxidová a neoxidová.

SiC kontinuální vlákna

Kontinuální SiC vlákna jsou vyráběna jako borová vlákna metodou CVD (firma Specialty Materials, Inc.) nebo z vláken polymerních prekusorů. Podstata výroby je na následujícím obrázku



Jsou relativně levná (cca 220 \$/kg), protože výchozí suroviny (organosilany) jsou dostupné ve velkém množství slouží i pro jiné účely). Vlákna jsou používána pouze s kovovými, keramickými nebo uhlíkovými maticemi (Ceracarb[®], firma Hitco Carbon Composites) na speciální součásti pro letecký průmysl a pro výrobky pracující za vysokých teplot. Whiskery SiC jsou vhodné k vyztužování kovových matic na bázi slitin Al a Ti. (z Al slitin zpevněných SiC whiskery jsou vyráběny písty spalovacích motorů pro závodní stroje). Nejlevnější whiskery SiC jsou vyráběny pyrolýzou rýžových slupek.

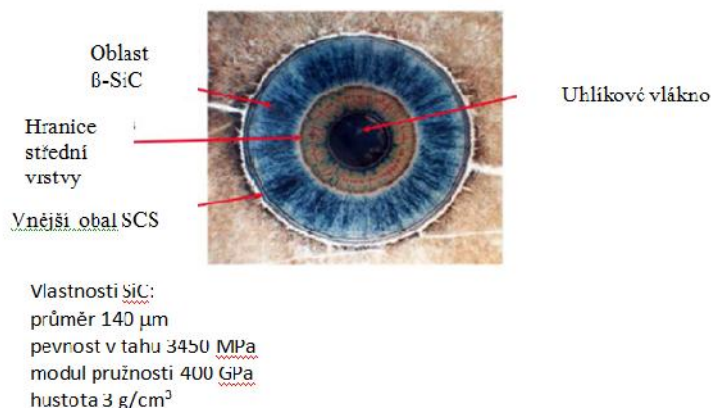
Při CVD výrobě je do reaktoru vhozen silan obsahující uhlík (např. CH_3SiCl_2) a jako substrát je použito uhlíkové vlákno. Takto vyrobené vlákno má velký průměr.

Výroba SiC vláken byla zavedena u firmy AvcoSystems' Lowel, která vyráběla i borová vlákna. Výroba byla koupena firmou Textron a v roce 2001 byla založena firma Specialty Materials, Inc., která výrobu převzala. Vlákna jsou známa pod označením SCS). Vlákna SCS Ultra mají pevnost 1 GPa oproti vláknu SCS-6.

Pro matrice Si_3N_4 jsou SiC vlákna opatřena ovlakem nitridu boru (BN) pro zvýšení jejich tahové pevnosti.

<http://www.specmaterials.com/products.htm>

SCS-6



Typickým vláknem s malým průměrem, vyrobeným z polymerního prekursoru, je Nicalon[®] od firmy Nippon Carbon Company (Japonsko). V první etapě je polydimethylsilan tepelně zpracován za vysokého tlaku (10 MPa), poté ve vakuu destilován, aby vznikl polykarbosilan. Z nich jsou potom spřádána vlákna, která se nechají oxidovat za teploty 200°C. Zvýšením teploty na 1600 °C v inertním prostředí ve vlákně o průměru 12 μm vzniknou malé (asi 2 nm) krystalky β-SiC.

Vlákno netvoří jen SiC, protože zbytky kyslíku vytvářejí SiO_2 . Typické složení Nicalonu je 59 % Si, 31% C a 10% O. Hi-Nicalon[®] je opatřeno povlakem BN nebo povlakem BN/SiC. SiC vlákno vyrábí také COI Ceramics, Inc. (USA) pod obchodní značkou Sylramic[®].

Podobným druhem vlákna je Tyrano[®] od japonské společnosti UBE Industries, které je polykrystalický SiC, obsahující malé množství hliníku. Vlákno Tyrano SA[®] má malou ztrátu hmotnosti při teplotě 2200 °C. Vlákno Tyrano[®] může být vyráběno také z polytitanokarbidu. Vlákna jsou průhledná, obsahují jak Si a C, tak N a O. Nejnovější vlákna jsou také vyráběna z methylpolydisilylazanu (MPDZ) a hydridopolysilylazanu (HPZ).

Al_2O_3 kontinuální vlákna

Al_2O_3 má vysoký bod tání (>2000°C) a relativně malou viskozitu po roztavení.

Hlavní metody výroby vláken jsou:

- výroba vláken z vodní suspenze jemných částic Al_2O_3 a slinutí vytvářených vláken. Částice Al_2O_3 slinou. Průměr vláken je 10-20 μm a velikost krystal 0,5 μm. Takto vyrobená vlákna jsou však náchylná k růstu zrna a tečení za zvýšených teplot
- sol-gel metoda+viskózní, vysoce koncentrovaný roztok směsi obsahující částice Al_2O_3 a dalších oxidů je zvlákněn, vlákna sušena a nakonec tepelně zpracována. Při tepelném zpracování dojde k odstranění tekavých podílů a ke krystalizaci různých forem Al_2O_3 ($\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ a $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$).

- z vláknového polymerního prekursoru.

Japonská společnost Sumitomo vyrábí vlákna Al_2O_3 pod obchodní značkou Alteex.

Modifikace $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ má maximální teplotu použití 900°C . Modifikace $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$ zatím používána není, vlákno by však mělo nejmenší hustotu. Vlákno $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$ může být použito do teplot 1600°C . Pro výztuž kovových matic jsou dnes používána především vlákna $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$. Vlákna s povlakem $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, opatřená povlakem SiC, mohou dosahovat pevnosti v tahu až 19000 MPa a mají velkou odolnost proti abrazi.

Metodou sol-gel se vyrábí také diskontinuální vlákna dlouhá $0,5\text{ m}$, s průměrem $3\text{ }\mu\text{m}$ a obsahující 4% SiO_2 (Saffil[®] a Safimax[®] od firmy Saffil Ltd). Pro jejich výrobu musí mít roztok (sol) malou viskozitu (cca 2 Pas). Pro kompozity jsou určeny typy Nextel 610 a Nextel 720.

Si_3N_4 vlákna

Také tato vlákna lze z polymerního prekursoru vyrábět kontinuálně. Nejlepší je ale příprava whiskerů Si_3N_4 . Výchozím produktem může být prášková směs nerostu Sepiolitu ($\text{Mg}_3\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) a polyakrylonitrilu. Při pyrolyze prášku při teplotě 1350°C vznikají whiskery Si_3N_4 (firma Tatego Chemical Industries Co.) Whiskery Si_3N_4 jsou elektricky nevodivé a odolné proti opotřebení.

Diamantová vlákna

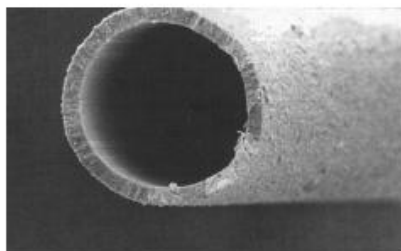
<http://mole.chm.bris.ac.uk/pt/diamond/pdf/mst10-505.pdf>

Tato vlákna vynikají velkým modulem pružnosti (900 GPa) a velkou pevností ($0,5\text{-}1,4\text{ GPa}$) při hustotě $3,5\text{ g/cm}^3$. Používají se jako výztuž titanových slitin.

Vyrábí se metodou CVD ("Chemical Vapour Deposition"). Substrátem, na kterém zárodky diamantu rostou, může být Al, Si, Cu, měď potažené uhlíkové vlákno, vlákno SiC nebo drátky W, Mo, Ti. Do reaktoru se vhání CH_4/H_2 .

Diamantová vlákna mají velkou tepelnou vodivost, asi 4 až 5krát větší než měď.

Vyrábí se také dutá vlákna, odleptáním kovového substrátu. Jsou používána v optice jako "photogenic-crystal fiber" i jako výztuž kompozitů s maticí ze slitin titanu.



. Vlastnosti zna kových keramických vláken.

Výrobce	Obchodní název	Složení	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]	Hustota [g/cm ³]	Pr m r [μm]
Nippon Carbon Co.	Nicalon	50 % Si, 31% C, 10% O	2520-3290	182-210	2,55	10-20
Specialty Materials, Inc.	SCS-6 CVD technika	SiC	3900	406	3	143
DuPont	IP	99% Al ₂ O ₃	1400	385	3,9	20
DuPont	IP166	Al ₂ O ₃ 15-25% ZrO ₂	2100-2450	385	4.2	20
Sumitomo Chemicals Co.	Altex	85% Al ₂ O ₃ 15% SiO ₂	1800-2600	210-250	3,2	9-17
UBE Industries	Tyrano	Si, Ti, C, O	>2970	>200	2,4	8-10
Dow Corning	MPDZ (methylpolydisilylazan)	47% Si, 30% C 15% N 8% O	1750-2450	175-210	2,3	10-15
Dow Corning	HPZ (hydridopolysilylazan)	59% S, 10% C 28% N 3% O	2100-2450	175-210	2,65	10-15
Dow Corning	MPS (methylpolysilan)	69% S 30% C 1% O	1050-1400	175-210	2,65	10-15
Dow Corning Dow Corning	Sylramic Sylramic BN	Prekursor pro Sylramic BN Boronitridový povlak				
3M	Nextel 312	62% Al ₂ O ₃ , 14% B ₂ O ₃ 15% SiO ₂	1750	154	2,7	11
3M	Nextel 440	70% Al ₂ O ₃ 2% B ₂ O ₃ 28% SiO ₂	2100	189	4,05	10-12
3M	Nextel 550	73% Al ₂ O ₃	2000	193	3,3	10-12
3M	Nextel 610	>99 Al ₂ O ₃	3100	380	3,9	10-12
3M	Nextel 720	85% Al ₂ O ₃ 15% SiO ₂	2100	260	3,4	10-12

PIEZOELEKTRICKÁ KERAMICKÁ VLÁKNA (PZT)

<http://www.advancedceramics.com/pages/products/>

<http://www.piezotechnologies.com/Ceramics/quick-selection-chart.aspx>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>

<http://www.youtube.com/watch?v=Vc3uZNaAIU>

Jsou to ohebná vlákna z oxid olova, zirkonia a titanu (Pb, ZrO₃, PbTiO), která umožní výrobu „chytrých“ kompozit .

Piezoelektrický materiál se chová tak, že

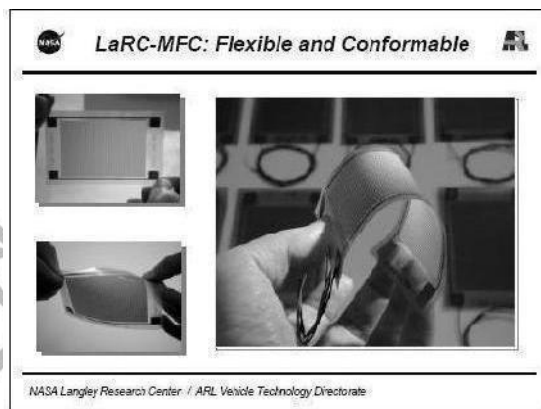
- při mechanickém namáhání vytváří elektrický náboj
- v elektrickém poli mění rozměry

Americká společnost Advanced Ceramics, Inc. vyvinula levnou technologii pro výrobu ohebných keramických piezoelektrických vláken. Tato vlákna jsou použita nejen v „chytré“ sportovní výzbroji, ale i v kompozitních dílech, v nichž se mohou uplatnit jako vlákna aktuátor (měnící tvar dílu) a jako senzory (měření zatížení). Aktuátory s PZT vlákny jsou o 35% lehčí než konvenční piezoelektrické aktuátory z monolitického PZT. Vlákna PZT jsou vyráběna procesem “Viscose Suspension Spinning Process” (VSSP). Vodní suspenze práškových oxid olova, zirkonu a titanu je smíchána s viskóznou (xanthogenátem celulózy), rozpuštěnou v NaOH. Směs je vytlačována tryskami (100 až 1000 otvorů průměru 50 až 900 μm) do roztoku speciální soli. Chemickou reakcí se celulóza regeneruje a s ní zároveň dehydratuje vlákno. To je potom spékáno (sintrováno). U kompozit je vlákno s cyklicky proměnným přetěžením velmi dobře mechanicky zakotveno v polymerní matici. Existuje 17 typů vláken. Rozsah průměru PZT vláken se pohybuje od 13 do 250 μm, pevnost v tahu je okolo 40 MPa, modul pružnosti E 6,5-7 GPa a jejich hustota je přibližně 7600 kg/m³.

PZT aktuátory jsou používány v letectví, aby umožnily změnu tvaru (u vrtulníků se s jejich použitím dosáhne změny hlučnosti rotoru). http://www.piezo.dk/Files/Billeder/Pdf/ACTUATOR_DESIGN_FOR_THE_ACTIVE_TRAILING_EDGE.pdf.

Špičkové tenisové rakety lyže a snowboardy (například od firmy Head) obsahují keramická PZT vlákna, protože vlákna mohou aktivně tlumit vibrace. Například u rámu tenisové rakety s PZT vlákny vzniká při namáhání elektrický náboj, který je přiváděn do elektronického zařízení (mikroprocesoru) v rukojeti rakety. Elektrická energie je nejdříve „skladována“ a s určitým zpožděním zase uvolněna zpět do PZT vláken, aby způsobil jejich deformaci. Jinými slovy odpadová energie je využita k aktivní změně tvaru bez nutnosti použít externí zdroj (baterii). Při optimálním zpoždění dochází k aktivnímu tlumení vibrací. Aktivní tlumení umožní zvůžit až o 15% sílu úderu do tenisového míče a při používání „inteligentní“ rakety je také zmenšeno nebezpečí vzniku tenisového lokte.

Vláknový aktuátor s PZT vlákny je ukázán na následujícím obrázku.



Snímá e na piezoelektrické bázi mohou monitorovat „zdraví“ konstrukce podobn jako optická vlákna (mohou být zabudovány unit vláknových kompozit).

Speciální p ípad užití piezoelektrických vláken je jejich zabudování do kompozitních bójí, které mechanickou energii vln p evád jí na elektroluminiscen ní sv tlo.

WHISKERY (BEZDEFEKTNÍ MONOKRYSTALY)

http://en.wikipedia.org/wiki/Monocrystalline_whisker

Základním znakem whisker je to, že jsou to monokrystaly ve tvaru krátkých vláken a p i velmi malém pr m ru mají vysoký štíhlostní pom r.

Významným znakem whisker je velká pevnost, zp sobená minimem m ížkových poruch. Whiskery mohou být:

- kovové (ísté kovy) nebo slou eniny kov
- keramické (oxidy Al_2O_3 , karbidy SiC, nitridy Si_3N_4)
- uhlíkové

Nejv tší význam pro keramické matrice mají whiskery keramické, tj. α -SiC a β - Si_3N_4 .

Druhy m ížek SiC whisker jsou: β -SiC kubická m ížka, α -SiC hexagonální m ížka (SiC je intermediární fází diagramu Si-C).

Výroba whisker spo ívá v katalyticky podporované kondenzaci p esycených par na podložce (metoda VLS, "Vapor-Liquid-Solid") nebo pyrolýzou prekursor . U SiC whisker jsou to polykarbosilany. Nejlevn jí se vyráb jí whiskery SiC, kdž prekurem jsou rýžové slupky V prvním stupni se va ením slupek odstraní prchavé podíly. Potom následuje oxidace p i teplot 700°C. P i teplotách 1500 až 1600°C v inertním nebo reduk ním prost edí se vytvo í SiC podle rovnice $3C+SiO_2=SiC+2CO$. Produkt je potom znovu oh át v oxida ní atmosfé e na 800 °C, aby se odstranil volný uhlík. Výt žnost SiC whisker je asi 5 až 10 %, zbytek pyrolýzy slupek tvo í deskovité ástice SiC. Takto získané SiC whiskery obsahují na povrchu ur itý podíl SiO_2 a uhlík.

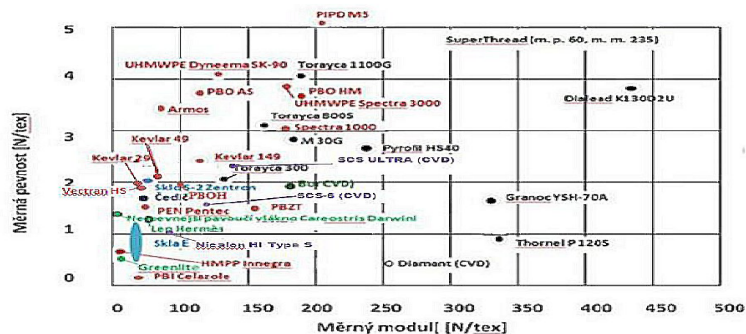
P ehled n kterých komer ních whisker a jejich vlastnosti udává následující tabulka.

Složení whiskeru	Obchodní zna ka	Pr m r [μm]	Délka [μm]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul E [GPa]	Sou initel délkové teplotní roztažnosti [$10^{-6}1/K$]	Hustota [g/cm^3]
Al_2O_3	Saffil	3,0		2000	310		3,3
Al_2O_3	Nextel	3,5		1720	152		3,1
SiC	Tokawhisker	0,1-0,5	30	3000-14000	400-700	4,5	3,18
SiC	Silar SC-9	0,5-0,6	10-80	6900	690	4,5	3,18
SiC	Silar SC-10	0,6	10-80	6900	690		3,18
SiC	Tokamax	0,1-1	50		600	4,5	3,18
SiC	SCW-1	0,05	10-40		600	4,5	3,18
β - Si_3N_4	SN-WB	0,2-0,5		až 14000	385		3,18

SiC whiskery malého pr m ru (pod 1 μm) jsou dob e ohebné a velmi pevné, takže se smykovými silami v slinované keramické matici tém neporušují (na rozdíl od krátkých sklen ných a uhlíkových vláken). Vdechnuté whiskery mají karcinogenní ú ínek, jejich fyzikální ú ínek v tkáni plíc je podobný jako u úlomk vláken azbestu.

Whiskery lze použít i u kompozit obsahujících kontinuální vlákna. U laminát totiž zvyšují mezilaminární pevnost (na prepreg se nast íká suspenze whisker v izopropylalkoholu). Whiskery ze slou enin kov vyráb né japonskou firmou Shikoku mají vlastnosti uvedené v následující tabulce. Jedná se o aluminium boráty.

whisker Alborex	
Chemické složení $9(Al_2O_3)(B_2O_3)$	Délka 10-30 μm Pr m r 0,5-1 μm
Hustota 3,0 g/cm^3 Obsah vody 0,5% maximáln Tvrdost Mohsovy stupnice 7 PH 5,0-7,5	Bod tání 1420-1460°C Pevnost v tahu 8000 MPa Modul pružnosti v tahu 400 GPa Sou initel délkové tepelné roztažnosti $4,2 \cdot 10^{-6} 1/K$



Výchozí pevnosti v tahu a moduly E a hustoty byly zjištěny i při pokojové teplotě.

Pomocí T_{tex} je posuzována jemnost vláken (také bývá nazývána délková hustota (lineární hustota)). http://en.wikipedia.org/wiki/Units_of_textile_measurement

$$T[\text{tex}] = \frac{M[\text{g}]}{L[\text{km}]} = \frac{m[\text{mg}]}{l[\text{m}]}$$

T je jemnost v tex,

L je délka v kilometrech, l je délka v metrech

M je hmotnost v gramech, m je hmotnost v miligramech

PBI je mezinárodní zkratka pro polybenzimidazol. Vlákná jsou vhodná na výrobu filtrů pro horké a chemicky agresivní spaliny, na ohnivzdorné obleky a pro separační membrány palivových článků. Rozpuštěný PBI je vhodným precursorem matrice kompozitů uhlík-uhlík. PBI je také používán pro přípravu nanokompozitů (je vyztužen uhlíkovými nanotrubičkami). Vlákná PBI jsou vhodná také pro tepelnou izolaci. PBI je také součástí ruského aromatického kopolyamidu Armos®.

Vlákná PEN (PenTec®) se používají na plachty plachetnic, na lana a pro zpevnění pneumatik. Vlákná HMPP jsou vysokomodulová polypropylenová vlákna, jejichž relativní permittivita a ztrátový index jsou výrazně menší než hodnoty stejných parametrů skleněných vláken.

Vlastnosti ICP vláken Vectran jsou na webu <http://www.swicofil.com/vectran.html>

Uhlíková vlákna Torayca jsou na webu <http://www.toraycfa.com/>

Uhlíková vlákna Thorne jsou na webu <http://www.matweb.com/search/GetMatlsByTradename.aspx?navletter=Ttn=ThorneI%20%AE>

Uhlíková vlákna ze smoly Dialead jsou na webu <http://www31.ocne.jp/~ngf/english/product/pl.htm>

Uhlíková vlákna Granoc jsou na webu <http://web.mit.edu/course/3/3.91/www/slides/cunniff.pdf>

O polymerních vlákních PIDP je pojednáno na

<http://web.mit.edu/course/3/3.91/www/slides/cunniff.pdf>

Sklená vlákna S-3 UHM™ (nová vlákna společnosti AGY) nebyla do grafu zakreslena.

Polyethyltereftalátová, polyimidová, polyketonová, polyarylenetherketonová, polyetherimidová a polyfenylsulfidová vlákna nemohla být do grafu zakreslena, protože nebylo možno zjistit jejich modul pružnosti v tahu. Navíc, vyjma polyester naftalátového typu, polybenzimidazolových a polyetherimidových, nejsou vlákna pro zpevnění kompozitů používána. Polyketonová vlákna jsou používána pro zpevnění elastomerů.

Vlákná Spectra 1000 a Spectra 3000 jsou zakreslena. Vlákná s velkou pevností Spectra 3000 v matwebu nejsou uvedena. Jsou používána na neprůstelné vesty a pro panely SpectraShield™ (polymerní laminát obsahující křídlově vrstvené jednosměrné vrstvy vláken Spectra 3000 a keramické destičky z karbidu boru (B₄C).

<http://www.matweb.com> "Trade name"

Vlastnosti vlákna SuperThread™ (viz Uhlíkové nanotrubičky, strana 40) odpovídají kroucenému vlákně o průměru 3 μm, s předaným zjednotněným nanotrubičkám (m.p. znamená průměrná pevnost, m.m. průměrný modul). Průměrná pevnost je tak velká, že v daném souadnicovém systému poloha vlákna nelze zobrazit.

Do grafu bylo přidáno nejtužší uhlíkové vlákno Pyrofil HS40, ruský aromatický kopolyamid Armos, diamantové vlákno, LCP vlákno Vectran HT, vlákno PBZTa PBOH.

Vlákná lnu kultivaru Hermès jsou velmi pevná (1795 MPa), jsou pevnější než devocelulózový Greenlite™, nedosahují však pevnosti nejpevnějších vláken madagaskarského pavouka Caerostris darwini (1850 MPa).

Podle grafu má nejvyšší pevnost má kultivar lnu Jarok, vyšlechtěný v Bělorusku. Vítejte jsou kultivary lnu na webu http://www.sempra.cz/lng/eng/fibre_flax.htm

Chceme-li vypočítat pevnost v tahu nějakého vlákna v MPa, musíme údaj měrné pevnosti (N/tex) násobit hustotou vlákna v kg/m^3 . Při výpočtu modulu pružnosti v tahu vychází stejnou procedurou údaj také v MPa.

Příklad: chceme zjistit pevnost v tahu standardního uhlíkového vlákna Torayca T300. Měrná pevnost je 2,02 N/tex, hustota vlákna je 1760 kg/m^3 . Pevnost v tahu je tedy 3530 MPa.