

## Obsah

VLÁKNA PRO KOMPOZITY.....	2
Typy produktů z vláken .....	2
SKLENĚNÁ VLÁKNA.....	7
Složení.....	7
Úprava povrchu skleněných vláken .....	10
Výrobky ze skleněných vláken.....	9
Skleněná optická vlákna .....	14
Skleněná optická vlákna jako senzory („chytrá“ optická vlákna, “Smart Fibres”) .....	16
Safírová optická vlákna.....	16
UHLÍKOVÁ VLÁKNA.....	16
Mikrostruktura a topografie uhlíkových vláken .....	16
Hlavní druhy uhlíkových vláken.....	22
Současní výrobci uhlíkových vláken.....	24
Některé webové adresy pro uhlíková vlákna .....	27
Úprava povrchu uhlíkových vláken .....	28
Značení uhlíkových vláken .....	28
Uhlíková vlákna SBCF (“Stretch Broken Carbon Fiber”).....	32
Krátká uhlíková vlákna VGCF (“Vapour-Grown Carbon Fibers”).....	32
Uhlíková vlákna z nanotrubiček .....	32
Uhlíkové whiskery GCN (“Grown Carbon Nanoparticles”) .....	32
Levná uhlíková vlákna pro automobilový průmysl (“low-cost carbon fiber”, LCCF .....	33
Ponižovaná krátká uhlíková vlákna .....	34
POLYMERNÍ VLÁKNA .....	34
Aromatické polyamidy (aramidy, APA).....	35
Polyethylentereftalátová vlákna (PET) .....	40
Polyetherimidová vlákna (PEI).....	41
Polybenzimidazolová vlákna (PBI) .....	41
Polyimidová vlákna (PI) .....	41
Polyketonová vlákna (POK) .....	37
Vlákna z aromatických polyetherketonů (PAEK, polyaryletherketon).....	41
Polyfenylsulfidová vlákna (PPS).....	42
Vlákna UHMWPE .....	42
Vlákna HMPP (vysokomodulová vlákna polypropylenu).....	42
Vlákna z termotropních aromatických kopolyesterů (LCP, “Liquid Crystal Polymer”).....	43
Vlákna na fenol-aldehydové bázi.....	43
Vlákna PBO .....	44
Vlákno PBZT.....	44
Vlákno PBOH.....	44
Vlákno M5 (PIPD) .....	45
Vlákna z polyesterů naftalátového typu, polyethylnaftalát (PEN) a polybutylnaftalát (PBN).....	45
ČEDIČOVÁ VLÁKNA.....	45
PROTEINOVÁ VLÁKNA (VLÁKNA PAVOUČÍ) .....	46
PŘÍRODNÍ VLÁKNA Z ROSTLIN.....	48
PŘÍRODNÍ JÁDRO SENDVIČŮ-BALZA .....	50
PŘÍRODNÍ MINERÁLNÍ VLÁKNA .....	50
VLÁKNA PRO VYSOKOTEPLTNÍ APLIKACE.....	51
Borová vlákna.....	51
SiC kontinuální vlákna .....	51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> kontinuální vlákna.....	52
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> vlákna .....	53
Diamantová vlákna.....	53
PIEZOELEKTRICKÁ KERAMICKÁ VLÁKNA (PZT).....	54
WHISKERY (BEZDEFEKTNÍ MONOKRYSTALY) .....	53
MĚRNÁ PEVNOST A MĚRNÝ MODUL VLÁKEN.....	56

*Bezpečné čtení PDF souborů je možné pouze s počítači s vyšším operačním systémem (Windows 7, 8, 9 a 10). Pro čtení PDF souborů je možno použít Adobe Acrobat Reader DC. PDF soubory lze také prohlížet v Google Chrome a programem PDF Editor 5.5 společnosti CAD-KAS. Absolutní odkazy jsou bezpečné (prověřeno WOT, McAfee SiteAdvisor (nyní McAfee WebAdvisor) 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

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

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

Kontinuální vlákna mohou být:

- skleněná
- čedičová
- uhlíková
- polymerní
- rostlinná
- pavoučí
- borová
- keramická

Vláknové **mikrokompozity** obsahují vlákna o průměru  $10^0$  až  $10^2$   $\mu\text{m}$ . Některé kompozity obsahují vlákna v podobě nanovláken a zařazují se proto mezi **nanokompozity**.

Pevnost vlákna je vždy významně větší než pevnost stejného materiálu v kompaktní formě. Příčinou je malý příčný průřez vláken. V tenkých vlákech jsou minimalizovány rozměry vrozených vad materiálu a také nebezpečnost povrchových vad je při velmi malých příčných rozměrech menší (tenká vlákna mají oproti stejně dlouhým vláknům větších průměrů významně menší povrch). Vady existují jen v podobě submikroskopických až mikroskopických trhlinek a dutinek, které jsou přednostně orientovány (protáženy) v podélném směru vláken. Whiskery jsou monokrystaly o velmi malých příčných rozměrech (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 zákrutů a se zákruty**
- **rovingy (pramence, kabílky)** (angl. “tow”) jsou sdružené prameny s nulovým nebo malým počtem zákrutů (méně než 40 zákrutů/m) pro výrobu profílů tažením, pro navíjení a pro výrobu prepregů. Jsou dodávány na válcových cívkách o větší hmotnosti (u skleněných vláken do 15 kg). Pro výrobu tkanin jsou rovingy dodávány na menších, kónických cívkách o jemnosti kolem 3K (číslo udává kolik tisícovek elementárních vláken je v rovingu). V metrické soustavě je udávána v tex. Tex je také délková (lineární) hustota, jednotkou je g/km. Udává kolik gramů má 1000 m vláknenného produktu. Často je použita i větší jednotka dtex, která udává počet gramů na 10000 m vláknenného produktu. Starší míra je denier, hmotnost v gramech při délce produktu 9000 m.
- **jednoduchá příze** (angl. “ yarn”) a **lablovaná příze**-vzniká zkrucováním pramenů a jejich sdružováním. Používá se pro výrobu technických tkanin.
- **rovingové tkaniny** (angl. “fabrics”), tkané z rovingů. Jsou určeny pro kontaktní laminování, pultruzi, navíjení a výrobu tkaninových prepregů. Nejvýznamější charakteristikou tkaniny je tzv. „gramáž“, která udává hmotnost  $\text{g/m}^2$  (udává též jemnost tkanin) a  $\text{tp}$  textilní vazby (plátno, kepr atlas).

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

- **TeXtreme**<sup>®</sup>, tkaniny švédské firmy Oxeon <http://www.oxeon.se/index.php?Page=textreme> jsou vyráběny tkaním pásků. Technologie umožňuje vytvářet i hybridní tkaniny (obsahjí vedle uhlíkových pásků i pásky s polymerními vlákny (s polymerními vlákny mohou být tkaniny až o 20 % lehčí než obvyklé tkaniny). Oproti běžným tkaninám mají tkaniny menší množství otvorů (umožňují dosáhnout velký objemový podíl vláken) a vlákna nejsou zvlněna. Produkt TeXtreme<sup>®</sup> se dodává v podobě pásu (šíře 20–50 mm) nebo tkaniny (šíře 300-1500 mm). Svazek vláken musí být rozprostřen. Pásy a tkaniny mohou mít různé směry výztuže. Uložení pásků [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 a filtrační tkaniny a geotextilie (technické tkaniny)
- **rohože** (angl. “mat”) jsou netkané textilie, rouna. Tvoří je v rovině ležící nahodile uspořádaná kontinuální vlákna nebo sekané prameny větší délky (cca 25–50 mm). Sekaná vlákna jsou v rohoži spojena polymerními pojivky rozpustnými v rozpouštědlových pryskyřicích. Použijí-li se k výrobě rohoží kontinuální vlákna, není zapotřebí udržet jejich vzájemnou polohu pojivem (vlákna jsou vzájemně propletena). Podobně jako tkaniny jsou i rohože charakterizovány gramáží.
- **prepregy** (angl. “prepregs”, vyslovuj „pripregy“) <http://www.merriam-webster.com/dictionary/prepreg> Jsou to různé široké rohože nebo kotouče, obsahující buď paralelně uspořádané rovingy 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 kompozitů. Při výrobě prepregu je na paralelně vedené rovingy nanášen reaktoplast. Tkaniny se impregnují většinou roztokem pryskyřice. Pro přípravu jsou vhodné pryskyřice epoxidové, fenolformaldehydové, kyanoesterové, bismaleinimidové, benzoxazinové, ftalonitrilové, polyhinoxalinové a polyimidové, ale prepregy se připravují i z polyesterových a vinylesterových pryskyřic. V prepregu je pryskyřice ve stavu B, kdy již vzniklo zesítnění molekul, ale síť má zatím velmi malou hustotu (pryskyřice je ve stavu lepidivého gelu).

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

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

S poklesem teploty se nevytvrzená pryskyřice může změnit 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 (většinou tekutý stav) přes B (částečně vytvrzený) do C (plně vytvrzený).

Při výrobě prepregů s termoplastickou maticí se používají tyto metody

- nanášení termoplastu v roztaveném stavu (vytlačování taveniny na výztuž)
- nanášení roztoku termoplastu na výztuž
- nanášení vodné suspenze termoplastického prášku na výztuž
- nanášení prášku polymeru na jednotlivá vlákna rovingu, slinování prášku (vyvoření filmu polymeru na vláknu) a opětné sdružení 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 směsnou hybridní tkaninu, níž je potřebné množství vláken termoplastu (PP, PA, PET), které se po roztavení změní v souvislou matici.

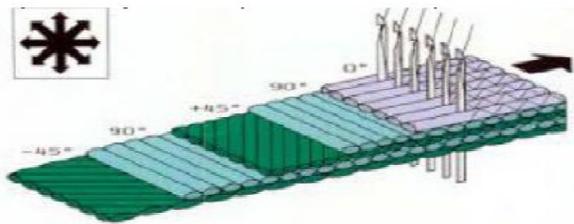
Další dělení prepregů je také možné podle geometrie výztuže:

- **jednosměrný prepreg** (angl. “unidirectional prepreg”, UD prepreg), vyrobený z rovingů, 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 potřebné tloušťky laminátu se vyrábějí:

- **vícevrstvé prepregy**, u kterých jsou jednosměrně vztužené vrstvy vzájemně vůči sobě potočeny (obvykle pod úhly 0°, +45°, -45° a 90°, u tzv C-PLY<sup>™</sup> laminátů pod úhlem 25°) a spojeny prošíitím polyesterovou nití (obchodní značka vícevrstvého polotovaru, tvořeného jednosměrně vztuženými vrstvami spojenými prošíitím, je Cotech<sup>®</sup> a Pyrofil<sup>®</sup>).

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

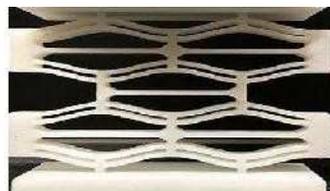
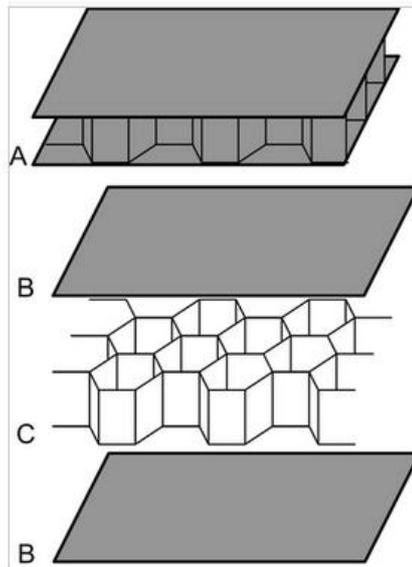


Tkaninové a rohožové prepregy lze obdržet také jako

- **kombinované prepregy**, únosnější vrstvy s tkaninovou výztuží se dávají na mechanicky více namáhanou stranu výrobků (při namáhání v ohybu na taženou stranu), vrstvy s rohožem na stranu vystavenou koroznímu prostředí (mají větší podíl pryskyřice).
- **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 pryskyřic (nenasyčené polyestery (UP) a vinylestery (VE)) s výztuží ze sekaných skleněných vláken. Toku pryskyřice je zabráněno chemickou reakcí ztuzující přísady nebo krystalizací složky pryskyřice (ne jejím částečným zesítním).

Zvláštním produktem, který je určen pro jádra sandvičových 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](http://www.spacedaily.com/reports/New_honeycomb_inspired_design_delivers_superior_protection_from_impact_999.html)

Voštiny jsou k potahu přilepeny. Při výrobě sandvičů se používá fólie lepidla, kterou se voštiny překrývají před přiložením potahů. 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 značky Nomex® a Kevlar® (značka Kotex® od společnosti DuPont), ve fenolformaldehydové pryskyřici (obě složky tj. vlákna i pryskyřice, zaručují voštině nehořlavost a malý vývin kouře při expozici v plameni).

Stěna buňky vláknové voštiny má vzhled papíru. Starší typ nomexové voštiny byl vyráběn z krátkých vláken levnějšího méně tuhého a méně pevného aromatického polyamidu polymetha-phenylenizoftalamidu Nomex® (MPIA), novější typ obsahuje kontinuální aramidová vlákna Hexcel vyrábí HexWeb®.  
<http://www.ambercomposites.co.uk/downloads/datasheet/hexweb-hrh-36-ma-y-2003.pdf>

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

může vzniknout oheň (u letadel a vrtulníků). K dispozici jsou i voštiny s křemennými vlákny.

[http://www.ultracorinc.com/papers/paper\\_bodyhtml](http://www.ultracorinc.com/papers/paper_bodyhtml)

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

**Distanční tkaniny** se vyrábějí především pro rozpouštědlové pryskyřice UP a VE. Dodávají se ve stlačeném stavu, s vlákny fixovanými pojivem rozpustným v pryskyřici. Po styku s rozpouštědlem pryskyřice (obvykle monomerní styren) dojde k expanzi tkaniny ve směru kolmém k jejímu povrchu.

Distanční tkaniny jsou výrazně levnější než voštiny umožňují snadnou výrobu tenkých profilů s proměnnou tloušťkou na rozdíl od voštiny z hliníkové fólie nebo z aromatických polyamidů s fenolformaldehydovou maticí, které se do potřebného tvaru obrábějí na frézce s vysokými otáčkami speciálním jednobřitým nástrojem. Pásky distanční tkaniny se uplatňují například při výrobě navíjených nádrží pro ekologicky nebezpečné látky. Uvnitř distanční tkaniny mohou být instalována čidla, která při úniku obsahu do meziprostoru varují obsluhu

Pro odlehčení konstrukce lze pro střední vrstvy laminátu použít také skleněné rohože typu U-PicaMat<sup>®</sup> nebo Unifilo<sup>®</sup>, které při malé plošné hmotnosti mají relativně značnou tloušťku.

[http://www.vetrotexeurope.com/pdf/sgvx\\_u700.pdf](http://www.vetrotexeurope.com/pdf/sgvx_u700.pdf) Uvedené produkty obsahují duté skleněné mikrokuličky (o průměru okolo 10 μm). Jako jádra sendvičových konstrukcí se používají i polymerní pěny, balza a syntaktické pěny (pryskyřice s dutými mikrokuličkami), nyní se vyrábějí sendvičové panely Tycor<sup>®</sup>.

Tkaniny a rohože lze vyrábět ze všech typů kontinuálních vláken. Výjimkou jsou borová a SiC vlákna získaná metodou CVD, tj. depozicí par na wolframové nebo uhlíkové vlákno. Tato vlákna jsou pro svou tloušťku málo ohebná a jejich vysoká tuhost je nejlépe využita při napřimených vláknech.

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

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

Kvalita vláken závisí jak na složení a čistotě výchozích surovin a na struktuře vláken. Stabilní mechanické vlastnosti během dalšího zpracování vláken zajišťují ochranné povrchové povlaky (tzv. "sizing"), které je nutno aplikovat na jednotlivá (elementární) vlákna ještě před jejich spojením do pramenu.

Průměr křehkých vláken je závislý na dalším zpracování. Pro tkaniny, kdy při tkaní jsou vlákna ohýbána, jsou vhodná pouze vlákna menšího průměru, protože existuje minimální poloměr  $r_{\min}$ , po jehož překročení vlákna praskají. Pouze na polymerních vláknech lze udělat uzel a zatáhnout ho bez porušení vlákna. Následující tabulka ukazuje minimální poloměr ohybu různých křehkých vláken.

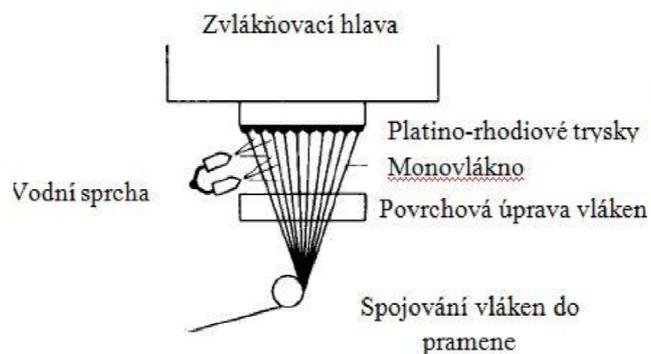
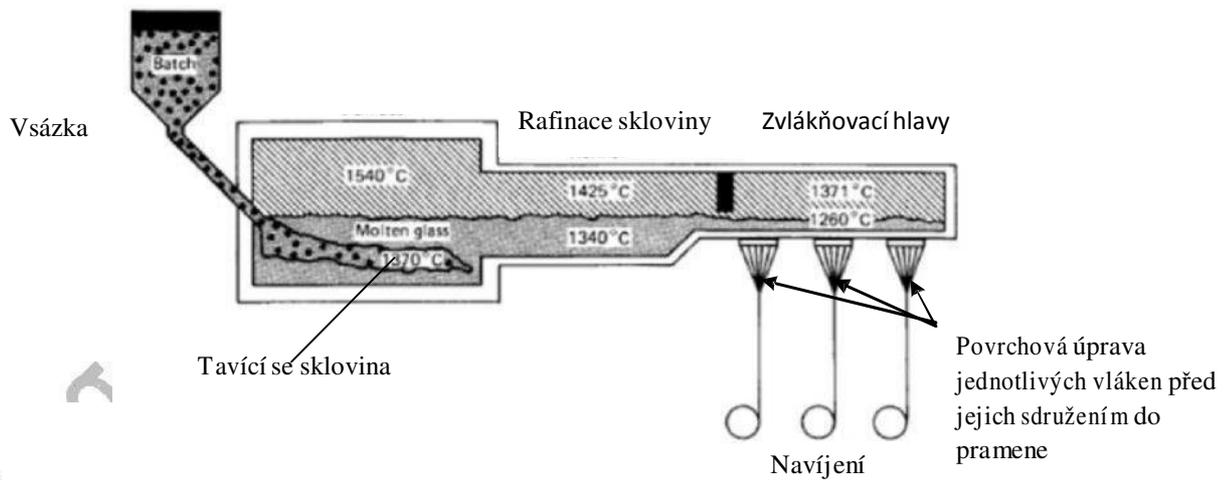
Vlákno	Průměr vlákna [μm]	Modul E [GPa]	$r_{\min}$ [mm]
uhlíkové	11	520	1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> FP <sup>®</sup>	25	345	3
SiC	9	300	0,5
B, SiC (CVD metoda)	200	400	14

## SKLENĚNÁ VLÁKNA

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

### Složení

Skleněná vlákna mají silikátový základ ( $\text{SiO}_2$ ). Vyrábějí se tažením taveniny směsi oxidů Si (s příměsí oxidů Al, Ca, Mg, Pb a B) a většinou s malým podílem oxidů alkalických kovů Na a K. Potřebného průměru vláken se dosáhne dlužením proudu skla tekoucího platinorhodiiovými tryskami (průměr trysky je 1 mm) ve dnu zvlákňovací 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 (pramenec). 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>

Chemikál	A sklo	C sklo	D sklo	E 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	Qiber	Tepluvzdorné sklo
SiO <sub>2</sub>	63 až 72	64 až 68	72 až 75	52 až 56	55 až 56	54 až 61	55 až 69	65 až 66	55 až 60	55 až 65		6,2 až 9		95 až 99	99,999	99,5	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 až 6	1 až 5	0 až 4	0 až 1	12 až 16	11,2	1 až 5	25 až 27	34 až 25			2,6					<0,05
TiO <sub>2</sub>	2 až 6				0 až 1,5		0 až 4										<0,15
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				0				0	0	0	0				0	0	
CaO	6 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		3	0 až 2			10	6	4 až 7		19,3					<0,02
Na <sub>2</sub> O																	
K <sub>2</sub> O	0,3	3	2		0,3	0,5					0,1						
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 až 0,8	0 až 0,8	0 až 0,5		0 až 0,3	0	0,2 až 0,8				0 až 0,05	0 až 0,3					<0,02
PbO												2,5 až 28					
TeO <sub>2</sub>																	10
Teplota měknutí [°C]			1500	915	830 až 860	1150				1560				1690			

• E sklo bez oxidu boru

**A sklo** je určeno pro architekturu a jako běžné lahvové sklo

**Vlákna ze skloviny C** s vyšším podílem alkálií, mají nižší teplotu měknutí, jsou méně pevná a jejich mechanické vlastnosti rychle klesají s rostoucí teplotou. V prostředí obsahujícím kyseliny větší podíl 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 činitelem

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

**Vlákna ze skloviny E** (tzv. bezalkalické vápenato-hlinito-křemičité sklo, sklo Eutal, má eutektické složení s nejmenší teplotou tavení, je nejlevnější (od 1,6 do 3,15 \$/kg) a přitom má 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 činitel (tangens ztrátového úhlu) při frekvenci 1 MHz je 0,0039) a poměrně dobrou odolnost proti hydrolýze (rozkladu v horké vodě). Chemicky odolnější E skla jsou bez oxidu boru (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

**Vlákna ze skloviny E-CR**, korozivzdorné sklo bez oxidu boru, obchodní značky Advantex<sup>®</sup>, vyráběné společností Owens Corning. Řídí se vícesložkovým fázovým diagramem (SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-MgO). Má větší hustotu, větší modul pružnosti, větší teplotu zvláknování, větší teplotu měknutí, větší odolnost v kyselém prostředí a horší relativní permittivitu než běžné E sklo.

**Vlákna ze skloviny AR** jsou vhodná pro alkalické prostředí. Sklovina je odolná vůči 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 větší podíl oxidu křemíku a hliníku a jsou dražší (jejich cena se pohybuje od 19 do 31,6 \$/kg), protože sklovina má větší teplotu tavení. Používají se většinou v kompozitech s epoxidovou maticí. Vlákna mají větší pevnost v tahu a větší modul pružnosti v tahu než standardní vlákna z E skla. Jsou bez oxidu boru (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

**Vlákna ze skloviny S-1** mají velkou pevnost, neobsahují B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Vlákna ze skloviny R** mají velkou pevnost, neobsahují B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Mají menší modul pružnosti než vlákna S.

**Vlákna ze skloviny S-1 HM™** mají větší modul pružnosti než vlákna S-2. Neobsahují B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Vlákna ze skloviny S-2** Neobsahují B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Pod obchodním názvem ZenTron<sup>®</sup> a VeTron<sup>®</sup> je vyrábí společnost AGY. (Společnost AGY také vyrábí ultrajemná skleněná vlákna BC2250 a BC3000 pro tištěné elektrické obvody, které potom mohou mít větší hustotu spojů). <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 vědeckých přístrojích.

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

**NDT sklo** – nové sklo společnosti Corning se jmenuje Gorilla<sup>®</sup> Glass 3 NDT™. Je odolné proti poškrábání, takže se hodí pro dotykové obrazovky (mobilní telefony, tablety, ultrabooky a notebooky) a na čelní 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 skleněná 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 izolační schopnost a v některých kompozitech se uplatní i jejich dobrá schopnost tlumit energetické rázy (kryty radarů a antény letadel). Jsou použita i v laminátu lyží Head, jejichž výrobce uvádí, že jde o nejlepší lyže na trhu právě díky použití dutých skleněných vláken (název dutých vláken je “Aircoat<sup>®</sup>”)

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

**L-Glass™** je nové sklo pro vysokofrekvenční tištěné elektrické obvody a pro radomy letadel (toto sklo má malou relativní permittivitu a malý ztrátový činitel oproti E sklu). Vyrábí jej společnost AGY.



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

**Křemenná vlákna** mají stejně nízkou relativní permitivitu jako polymerní aramidová vlákna, ale oproti nim mají o dva řády menší ztrátový činitel 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. Křemenné sklo měkne již při 1300°C, ale při větších teplotách se nestává kapalným. Společnost JPS Composite Materials Corp. vyrábí Astroquartz<sup>®</sup>, Astroquartz<sup>®</sup> II, Astroquartz<sup>®</sup> III, společnost Sain-Gobain dodává Quartzel<sup>®</sup>.

<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](http://jpsglass.com/jps_databook.pdf)

Výroba křemenných vláken spočívá v rozeletí čistého krystalického křemene a jeho roztavení (teplota tání 1600-1725 °C).

**Vlákna S-Q** tvoří přechod mezi křemennými a ostatními skleněnými vlákny. Obsahují 95 a více %SiO<sub>2</sub>

**Q-Fiber<sup>™</sup>** je křemenná vata pro tepelné izolace a filtraci.

[http://www.jm.com/engineered\\_products/filtration/products/qfiber.pdf](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 přenášet infračervené paprsky (optoelektronické prostředky pro noční vidění, „noktovisory“). Je vhodné pro optická vlákna a laserovou techniku. Další prvky v chalkogenidových sklech jsou Se, Ge, As, Sb, S, I a Ga.

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

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

O mikrostruktuře skleněných vláken je velmi málo poznatků vzhledem k jejich amorfnímu stavu, který je způsoben nepatrnou krystalizační rychlostí směsi oxidů při ochlazení taveniny. Předpokládá se, že na vysoké pevnosti skleněných 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 roztvoření vláken při tahovém zatížení. 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 neprojeví měřitelnou anizotropií elastických veličin skleněného vlákna. Při mikromechanických výpočtech se uvažují stejně veliké hodnoty modulu pružnosti E a Poissonova poměru ν ve směru podélném i příčném.

Vlastnosti skleněných vláken při 20°C

	SiO <sub>2</sub> C	SiO <sub>2</sub> D	SiO <sub>2</sub> E	SiO <sub>2</sub> F 95% SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub> G AR	SiO <sub>2</sub> H E FR	SiO <sub>2</sub> I HM	SiO <sub>2</sub> J	SiO <sub>2</sub> K	SiO <sub>2</sub> L UM	SiO <sub>2</sub> M Vnější K a J mm 1000	SiO <sub>2</sub> N	SiO <sub>2</sub> O L 100	SiO <sub>2</sub> P SQ	Křemenné sklo	Tellurové sklo
Průměr [μm]	300-13		300-10						300-20		300-10				300-14	
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	2,24	2,4	2,28		2,3			2,23	2,46	2,23			2,3		2,19	4
Modul [GPa]	69	22	76	88	75	90-95	90	85,5	90	69		62		69	23	23
Pevnost v tahu [GPa]	AS 2		3,1-3,2		1,7		3,09	3,93	4,29	3,2-3,3					3,43	
Prodloužení při přetážení [%]																
Součinitel lineární tepelné roztažnosti (10 <sup>-6</sup> /K)	3	3,11	3		3	3,2	4	3,9		3,21			3,9		3,8	1,3
Součinitel tepelné vodivosti (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	1	1,4			1											
Relativní permitivita při 1 GHz			4	0,3												
Ztrátový faktor při 20 GHz		0,002	0,005	0,007			0,0010						0,005		0,0002	
Teplota měknutí [°C]			503	518			738	1038	1053				1033			

U hodnot vlastností skleněných vláken převzatých z různých publikací není obvykle uvedeno, při jakém průměru vláken byly naměřeny. Je však známo, že čím mají vlákna menší průměry 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 skleněnými tkaninami z tenkých vláken bylo zjištěno, že se zvýšil i modul pružnosti. S vlákny velkých průměrů (60 a více μm) mají kompozity větší pevnost v tlaku působícím ve směru vláken. Rozdíly dosahují řádově desítky MPa. Z technologických důvodů jsou nejběžnější průměry od 7 do 15 μm (roving z vláken malých průměrů se totiž hůře prosycuje pryskyřicí).

Povrch skleněných vláken je hydrofilní. Oxidy SiO<sub>2</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 tchlínkách je při 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 % adsorbováno asi 0,1 % hmotnostních vody. Adsorpcí vlhkosti na povrch čerstvě vyrobených vláken je velmi rychlá (rychlost navlhání je možno demonstrovat například vážením vžíhaných skleněných vláken na analytických vahách, vlákna rychle zvětšují svou hmotnost). Adsorbovaná vlhkost působí v povrchových defektech vláken jako tenzoaktivní látka, snižující lomovou energii skla. Pevnost čerstvě vyrobeného vlákna je proto větší 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 skleněných vláken chránit před vzdušnou vlhkostí polyethylenovými obaly a navlhá vlákna se musí před použitím vysušet. Vysušování v horkovzdušné sušárně se u skleněných vláken (a výrobků z nich) doporučuje i tehdy, když jsou skladovány v relativně suchém prostředí.

## Úprava povrchu skleněných vláken

Při manipulaci s nechráněnými vlákny dochází při jejich vzájemném kontaktu k abrazi a následnému snížení pevnosti. Proto se každé jednotlivé vlákno ihned po vtažení z trysky ve dnu zvlákňovací 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, polyvinylakohol), které usnadňují 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 skleněným vláknům, tak k polymerní matici

K pozitivním účinkům ochranných prostředků patří snížení adsorbovaného podílu vody (mají určitý hydrofobizační 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 změn před spojením s polymerem a sklem. Vazebné prostředky nanášené ve vodném roztoku nevytvářejí na povrchu vláken souvislý film, ale jsou přítomny v podobě mikroskopických kapiček ulpívajících na sklu v místech s větším podílem reaktivních skupin (povrch skla má poněkud jiné složení než jádro). Již z tohoto důvodu nezabraňují silany (přes určité hydrofobní vlastnosti vnějších vrstev povlaků) působení vody na povrch vláken, spíše jenom znesnadňují difúzi molekul vody do kompozitu difúzi vody podél vláken. Molekuly vody které k vláknům difundují skrze polymerní matici, znovu hydrolyzují vazbu vazebného prostředku k povrchu skla. Ačkoliv jde v podstatě o reverzibilní proces, tj. po vysušení se kovalentní vazby opět obnoví, u mechanicky zatížených kompozitů tato hydrolyza umožňuje smykové posuvy vláken vůči matici, zvyšování množství adsorbované vody a nakonec může dojít i k úplnému porušení rozhraní vláken a matrice. U laminátu se skleněnou výztuží se takové porušení projevuje zbledením poškozeného místa.

V praxi jsou používané úpravy rozlišovány podle tvrdosti:

- **měkká** úprava
- **polotvrdá** úprava
- **tvrdá** úprava

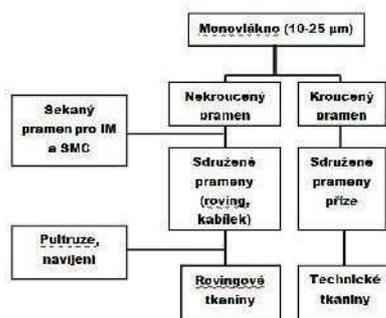
Tvrdost vazebného prostředku, daná jeho chemickou strukturou, určuje vhodnost rovingu pro další technologie. Tvrdá úprava, např. methakřysilanem nebo chromkomplexem (je používán termín „**tvrdý roving**“) zaručuje dobrou sekateľnost rovingu a rovnoměrný rozpad vláken při sekání, tj. vlastnosti potřebné při výrobě dílů pomocí stříkacího zařízení nebo při přípravě prepregu pro lisovací technologii (SMC). Je vhodná i při výrobě jednosměrných prepregů a rohoží. Měkká úprava (tzv. **měkký roving**) provedený např. vinylsilanem nebo aminosilanem zajišťuje rychlou smáčivost vláken polyesterovou pryskyřicí a používá se u rovingů pro navíjení, tažení profilů a pro tkaniny určené k výrobě členitých dílů. Jsou používány povlaky aminosilanu, silanoesteru, vinylsilanu, sírové silany polyurethanové (isokyanátové) silany a močovinnové 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 pryskyřice (epoxidový silan). Zvláštní povrchovou úpravu vyžadují skleněná vlákna do fenolformaldehydových pryskyřic. 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 pryskyřicemi vyžadujícími vytvrzování při velkých teplotách

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

## Výrobky ze skleněných vláken

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

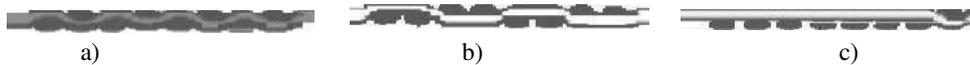


Označování vláken Saint-Gobain Adfors.cz s.r.o. v Litomyšli <http://www.vertex.cz/> je provedeno pomocí znaků T61C, T61, 876, T86, 30, TD37C/TD37SC. Kromě průměru vlákna je uvedena jemnost vlákna (lineární hustota v tex) a typ cívky.

Povrchová úprava vláken je opět označena T67, T61, T8, T30, TD37, TD52, T18 s krátkým popisem typu. Výrobcí 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 zvlákňovací 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.

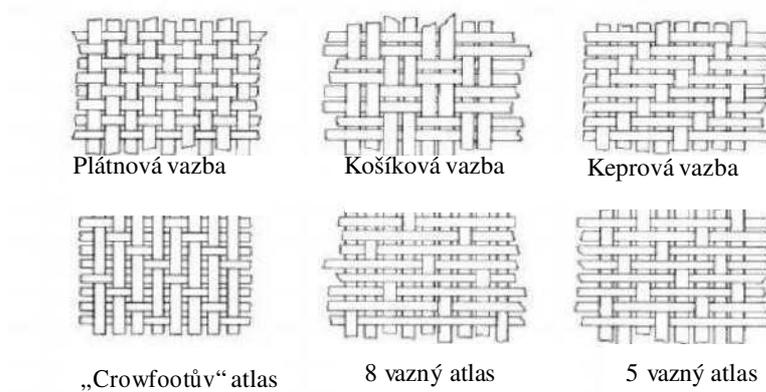
Rovingové tkaniny mají různou textilní vazbu. Vedle požadavků na tuhost a pevnost kompozitu o vhodné vazbě rozhoduje i tvarová členitost forem. Vzájemné uspořádání osnovy a útku v yvábí tři základní typy vazeb:

- **plátnová** vazba (angl. “plain”) je nejpevnější a také nejméně poddajná při tvarování, když rovingy v osnově i útku jsou stejně silné a stejnoměrně vzdálené. Pramen útku prochází vždy pod a nad každým pramenem osnovy (tzv. vyvážená plátnová vazba). Volnější a tím i poddajnější plátnovou vazbu vytvářejí dva a více pramenů útku, procházejícího pod dvěma nebo více nitěmi 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 další řadě se útek posouvá doprava nebo doleva vždy k nejbližšímu prameni osnovy. Na tkanině je tak vytvářen diagonální vzor. Pokud je použita vazba např. 3/1, znamená to, že jeden pramen osnovy je překryt třemi prameny útku a jedním pramenem útku na spodní straně. Keprových vazeb je více typů. Tkanina s keprovou vazbou je ohebnější než plátnová vazba, ovšem pouze při měkké povrchové úpravě vláken.
- **atlasová** vazba (angl. “satin”) je nejméně pevnou textilní vazbou. Jeden pramen osnovy je překryt čtyřmi 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 velký objemový podíl vláken ve vrstvě kompozitu a zaručuje minimální zvlnění vláken. S atlasovou tkaninou je tedy možno získat kompozit s větší pevností a tuhostí, než při použití ostatních vazeb.

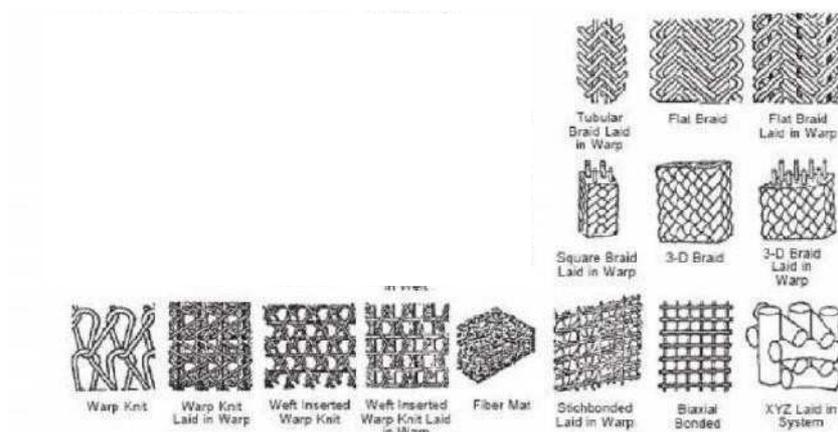


Druhy tkanin v bočním pohledu: a) plátno, b) kepr, c) atlas

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



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

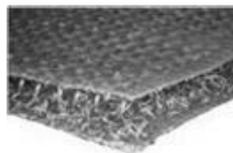


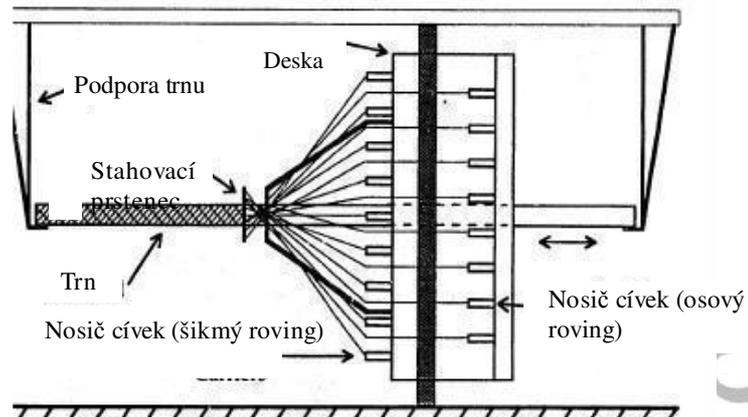
Rotačním pletením je možné připravit výztuž pro kompozit, která má roviny pleteniny vzájemně svázané v 3-D (prostorovém) uspořádání.

Cívky s roviny jsou uloženy na rohatkách, které jsou vybaveny spojkou a brzdou, což dovoluje přerušovaný otáčivý a translační pohyb cívek. Moderní stroje pro pletení mají většinou horizontální uspořádání.

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

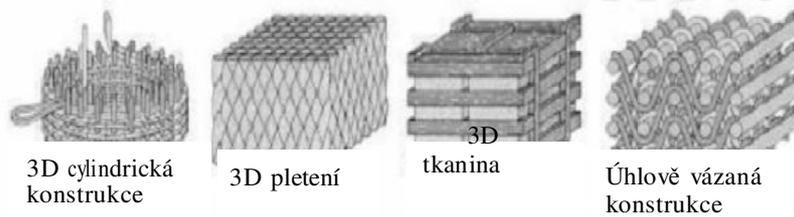
Na obrázku je pletený 3-D polotovár pro technologii RTM, který urychluje ukládání vrstev  
<http://www.compositesworld.com/articles/rapid-layup-new-3-d-preform-technology> (vyslovuj „priform“)



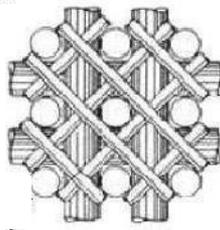


Pro dobré výrobky je nezbytné pro pletení použít CAE s příslušným softwarem, který optimalizuje pohyb cívek, vizualizuje schéma pletení a analyzuje mechanickou pevnost výrobku.

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 počtu pramenů 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 řídce vázáné 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/m<sup>2</sup>). Těžké tkaniny umožňují rychlé získání větší tloušťky laminátu), tloušťka, dostava (tj. podíl počtu pramenů nebo druzných pramenů v osnově k počtu pramenů v útku na 1 cm), druh pramene nebo příze pro osnovu a útek, šíře role (cm) a délka tkaniny v roli (m).

Tkaniny z příze mají podle počtu zákrutů, průměru příze a použité povrchové úpravy různou ohebnost. Jsou určeny pro výrobu elektroizolačních 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 (vytápění), chemická (rozpuštění) nebo kombinovaná úprava, aby lubrikace byla odstraněna. Je-li tkanina opatřena vazebním prostředkem, ten se z tkaniny neodstraňuje.

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

Pramenové skleněné rohože jsou obvykle vyrobeny ze sekaných vláken, tj. pramenců sekaných na větší 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 nenasycených polyesterů). Pro lisování může být pojivo pomalu rozpustné, pro kontaktní laminování, pro infuzní a injektážní technologie (metody SCRIMP, VP, VARM, RIM, RRM, SRIM, RTM, CAPRI a VAP) je žádoucí malá viskozita.

Výrobci polotovaru z vláken dodávají také kombinované výrobky

- tkaniny kombinované s rohožemi (vícevrstvé tkaniny)
- jednosměrné tkaniny (útek těchto tkanin obsahuje výrazně méně vláken než osnova)
- jednosměrné tkaniny s výztuží orientovanou vůči 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 potřebná 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/m<sup>2</sup> o tloušťce 0,96 mm, v němž jednotlivé orientované vrstvy jsou spolu vázány prošíáním tenkým pramenem (dříve se používalo vazby pomocí termoplastického prášku, který se v pryskyřici rozpustil). Výhodou spojení vrstev prošíáním je lepší tvarovatelnost vícevrstvého polotovaru, rychlejší smáčení vláken a nepřítomnost zbytků termoplastu na povrchu vláken. Příkladem hromadného použití vícevrstvých polotovarů je například výroba hřidel a listů vrtulí větrných elektráren 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 zpevněné textilní vazbou, jsou používány nejen při navíjení, ale také k dokončování spojů kompozitních dílů.

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 vlákny-vznikají **hybridní tkaniny**. Zkombinují-li se skleněná vlákna s termoplastickými vlákny vzniká směsná tkanina, která je vlastně prepregem, obsahujícím termoplastickou maticí 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 navinutím je zapotřebí polyamid roztavit, například laserem). Pramenový prepreg (s reaktoplastickou pryskyřicí ve stavu B) umožňuje navíjením zhotovit i díly s konkávními povrchy (např. pro výrobu sacího kanálu stíhačky F-22 byl použit pramenový prepreg s uhlíkovými vlákny a epoxidovou pryskyřicí (viz oddíl Technologie, strana 8).

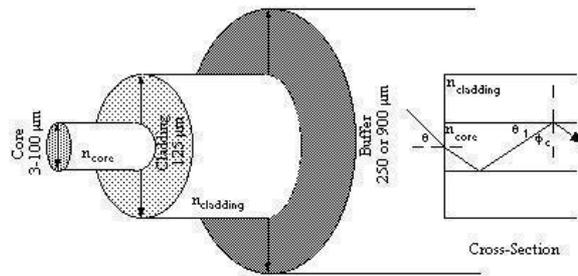
Prokládáním vrstev s výztuží z uhlíkových vláken vrstvami s aramidovou tkaninou dostaneme **hybridní laminát**, který při větší tuhosti, než má samotný aramidový kompozit, dosahuje i velké odolnosti proti průrazu. Je možno také kombinovat uhlíková a aramidová vlákna v jedné tkanině.

## Skleněná optická vlákna

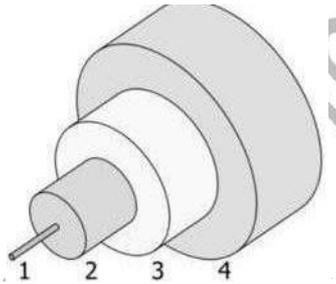
[http://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_fiber](http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber)

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

- jako **přenašeče**—elektrický signál je přeměněn pomocí světelných diod (LED) nebo polovodičových injektážních 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 skleněného 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:

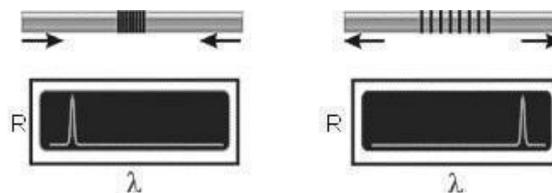


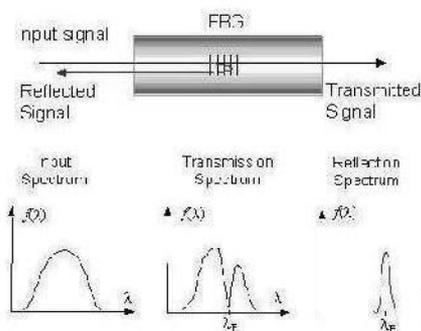
Jádro (1, "Core") je tvořeno sklovinou  $\text{SiO}_2$  s přídatnými prvky (tellur, germanium). Vrstva skla s menším indexem lomu než má jádro (2, "Cladding") odráží odchýlené paprsky (je tvořena pouze sklovinou  $\text{SiO}_2$  (může být též polymerní)). Další vrstva (3, "Buffer") chrání obě skloviny, funguje jako nárazník. Poslední vrstva (4, "Jacket") je z vláken (které přenášejí zatížení 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](http://en.wikipedia.org/wiki/Low_smoke_zero_halogen). Polymerní vrstva chrání kabel před abrazí a předpůsobením nepříznivých vlivů (fotodegradace UV zářením, působení olejů a rozpouštědel atd.).

Jednoduchá optická skleněná vlákna jsou nyní nahrazována mikrostrukturovanými optickými vlákny (MOF), zvláště těmi, které obsahují periodicky uspořádané podélné kanálky (fotonická vlákna). [http://en.wikipedia.org/wiki/Photonic-crystal\\_fiber](http://en.wikipedia.org/wiki/Photonic-crystal_fiber)

### Skleněná optická vlákna jako senzory („chytrá“ optická vlákna, „Smart Fibres“)

Skleněná 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 používá 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:



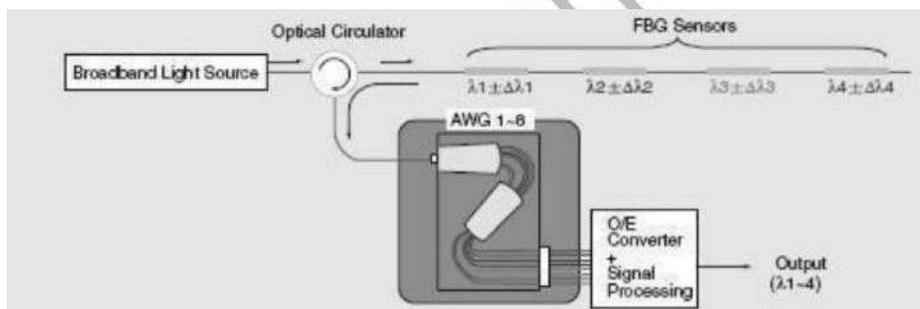


Zdrojem světla s měnitelnou vlnovou délkou je laser.

Rozměry optického vlákna (průměr pod 0,25 mm), dovolují vlákno zabudovat do kompozitních konstrukcí a měřit změny veličin. Přítomnost vlákna neovlivní negativně životnost konstrukce ani při dynamické únavě.

Vlákno FBG zabudované do kompozitního listu větrné elektrárny může sloužit i po dlouholetém provozu jako nové (nesmí ovšem dojít k jeho uvolnění od okolní matrice).

Jedno optické FBG vlákno může měřit změny teploty a deformace po celé délce, v níž je opatřeno soustavou rýsek, jak ukazuje následující obrázek:



Měřicí systém se skládá z výkonného laseru s měnitelnou vlnovou délkou světla, otáčející se clo n ky-zrcadla (“Optical Circulator”), FBG vlákna, fotodetektoru, zesilovače, světlo/elektro převodníku a jednotky pro zpracování signálu (obvykle počítače), který zpětně ovládá laser (citlivost systému je největší při optimální vlnové délce světla vycházejícího z laseru).

### Safírová optická vlákna

Krystal safíru ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) dobře propouští ultrafialové (UV), světelné a infračervené (IR) záření. Velká chemická odolnost (chemická netečnost) umožňuje i v silně korozivním prostředí přenášet optický signál. Safírová vlákna mohou pracovat i při teplotách do 2000 °C (teplota tání safíru je 2053 °C). Využívají se jako teplotní senzory při zplyňování uhlí a v moderních uhelných elektrárnách. Vlákna jsou dobře ohebná (důležité v medicíně, netoxická a biokompatibilní (product Bioceram<sup>®</sup>), mají velký modul pružnosti ( $E=345$  GPa, pevnost v tahu 410 MPa a větší povrchovou tvrdost než skleněná vlákna. Vlákno se vyrábí tažením krystalu skrze molybdenovou kapiláru. Safírová vlákna a další produkty vyrábí společnost Saint-Gobain Crystals (značky Saphicon<sup>®</sup> a Class<sup>®</sup> (světově největší safírová okna)), společnost Kyocera Co. (Japonsko, technologie zakoupena od Saint-Gobain), v České republice Crytur (dříve Monokrystaly) se značkou SaphiT<sup>®</sup>.

Porušují se laserovými paprsky až při vysokém výkonu ( $1200 \text{ J/sm}^2$ ).

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

Obal (“Cladding”) pro menší teploty je z polytetrafluorethylenu (PTFE) nebo polyimidu (PI), z napařeného oxidu křemíku (do 1000 °C), oxidu hořčíku a oxidu hliníku (do 1200 °C), případně z oxidu zirkonu, pro větší teploty z platiny nebo palladia, pro největší 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
R minimální [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 při poměrně malé hustotě ( $1,8-2 \text{ g/cm}^3$ ). Uhlík ve styku s méně ušlechtilým kovy vytváří galvanický člunek–dochází k elektrochemické korozi, při níž koroduje kov. Kompozit s uhlíkovými vlákny musí být proto od kovu oddělen nevodivým materiálem (například kompozitem se skleněnými vlákny).

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

[http://en.wikipedia.org/wiki/Galvanic\\_corrosion](http://en.wikipedia.org/wiki/Galvanic_corrosion)

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

Pořadí je upraveno především podle Beketovy řady v níž je titan řazen k neušlechtilým kovům. Za přítomnosti kyslíku se však titan pokrývá stabilní nerozpustnou vrstvou oxidů ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ti}_2\text{O}_3$ ), 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 měkký 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 vláknu pravidelně uspořádány ve sledu ABABA (jak by odpovídalo hexagonální mřížce), ale jsou vedle sebe umístěny 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“, ačkoliv některé zahraniční firmy pro výše tuhá uhlíková vlákna tento název používají.

Uhlíková vlákna se dnes vyrábějí převážně z vláken polyakrylonitrilových (PAN), vláken novoloidu–vláken fenol–aldehydových (Kynol®) ze sulfonovaného polyetyleny a z ligninu. ORNL je "Oak Ridge National Laboratory" v Tennessee., USA.

	Novoloid (Kynol®)		PAN (90 % CF je z PAN)		Sulfonovaný PE-LLD ("Linear Low Density") Vývoj v ORNL	Lignin z měkkého dřeva Vývoj v ORNL
Teplota zpracování [°C]	800	2000	1500	2000	900	
Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	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 ztráta hmotnosti	476	575	560			
Vzduch 250°C	0	0	0			
Vzduch 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 methylakrylátové kyseliny (MA), kyselina methylen-succinová (= "itaconic acid"), iniciátorem reakce je 2,2'azo-bis-isobutyronitril (někdy místo monomeru methylakrylátu 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 vláknu, které se vyrábí vytlačováním taveniny skrze kapiláry, se musí PAN skládat převážně z izotaktického PAN, který dává kvalitnější uhlíková vlákna než syndiotaktický a ataktický PAN.

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

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

[http://www.minatom.ru/en/news14302\\_23032009](http://www.minatom.ru/en/news14302_23032009)

Ve směru osy vlákna jsou protáhlé (acikulární) mikrokrystaly turbostratického uhlíku, v případě vláken vyrobených z PAN, tvořeny vždy několika paralelními aromatickými rovinami. V příčném řezu vlákna pásy nedosahují větších rozměrů a jsou různě stočeny. V podélném směru vlákna jsou mikrokrystaly vzájemně natočeny pod malými úhly (lze také říci, že pás rovnoběžných aromatických rovin je zvlněný). Mikrokrystaly lze v pásích lze detekovat RTG metodou, mají charakteristickou délku 10 až 50 nm. Z tloušťky 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 mikrokrystaly. Submikroskopické dutiny mají v příčném řezu rozměr okolo 3 nm. Důsledkem malého odklonu aromatických rovin mikrokrystalů od podélné osy vlákna je, že vlákna z PAN nedosahují větších modulů pružnosti, přesto však mají modul pružnosti  $E$  větší než ocel. Vysokou pevnost tzv. středněmodulových vláken (IM uhlíková vlákna o pevnosti až 7000 MPa) zaručují jemné mikrokrystaly a minimální množství defektů mezi nimi.

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

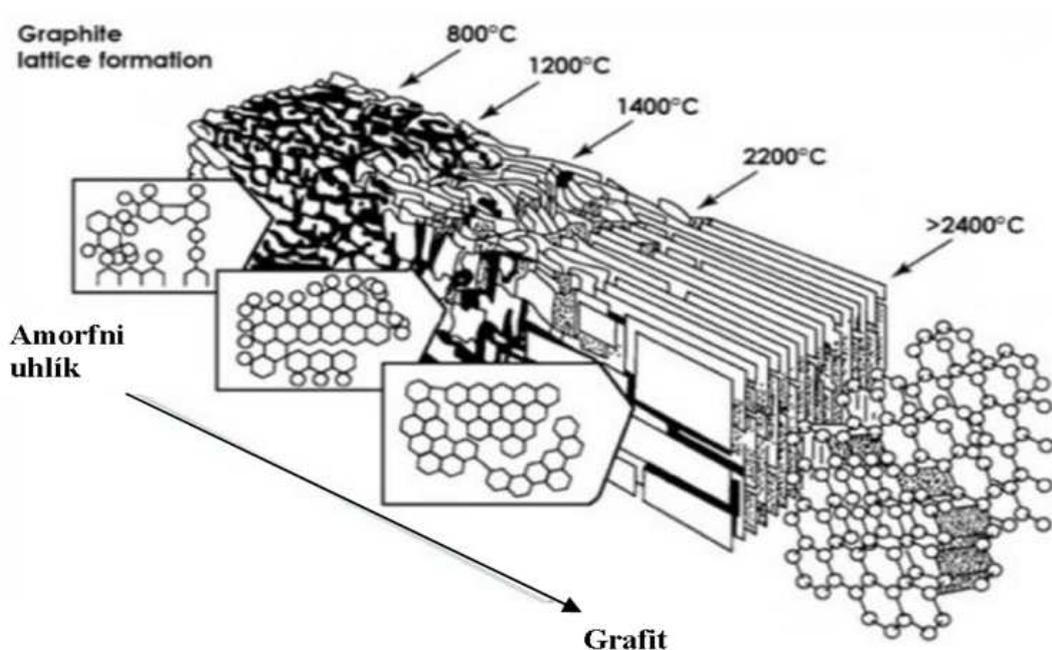
- **Stabilizace**-při teplotách 200 až 300 °C, za působení tahového napětí a v oxidačním prostředí je PAN vlákno stabilizováno. Dojde k cyklizaci vazeb v řetězci makromolekuly PAN (vyvoření paralelních žebříkovitých makromolekul) a k vzájemnému zesílení makromolekul kyslíkovými můstky. Vlákno při této etapě ztmavne a stane se netavitelným.

- **Karbonizace**-při teplotách od 1000 do 1800 °C v inertním prostředí (velice čistý dusík) ve vláknu proběhne 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 přírůstek tuhosti dosažen za cenu poklesu pevnosti, protože zvětšení velikosti mikrokrystalů vede též k zvětšování defektů mezi nimi. U nejužších vláken je používáno dlužení při grafitizaci. Při dlužení se zmenší úhel odklonu mikrokrystalů od osy vlákna (tzv. vysokomodulová vlákna (UHM, "Ultra High Modulus").

Změny struktury PAN vlákna jsou zobrazeny na následujícím obrázku.

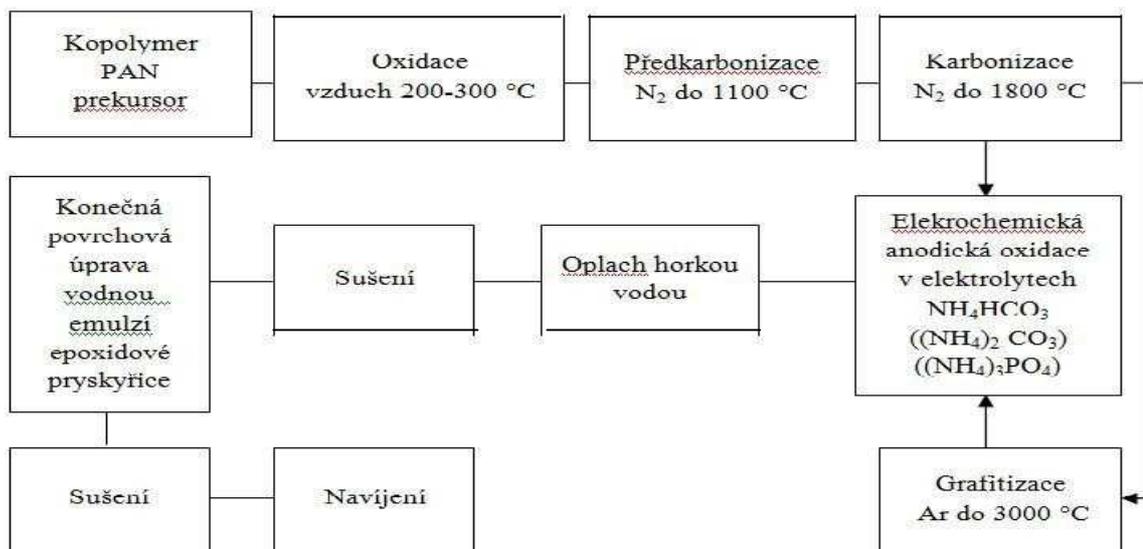


Linka na výrobu uhlíkových vláken

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



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



Pro výrobu nejtužších uhlíkových vláken se používá smol (zbytků 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 uspřádány, 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 zvláknování taveniny smoly (po zahřátí na potřebnou teplotu) se aromatické roviny orientují podél osy vlákna. Špičkové typy vláken, dosahující velkých hodnot modulu pružnosti v tahu E, se při grafitizaci ještě dlouží. 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 většinou zvlákněny). Jejich převládající uspořádání v příčném řezu je možno charakterizovat jako snopkovité, cibulovité, radiální, radiální zvlákněné, smíšené nebo nahodilé. Ve vláknech ze smol jsou vedle deskovitých krystalů turbostratického uhlíku též mikroskopické póry ve tvaru polyedrů, turbostratické mikrokrystaly a polykrystalicky 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 současně i velké pevnosti může být dosaženo také výrobou vláken s nekuhovým 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 vláknu 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 zvláknování prekurzoru), při které se dosahuje největší modulu pružnosti a pevnosti uhlíkového vlákna (modul E=930 GPa a pevnost v tahu 2750 MPa).

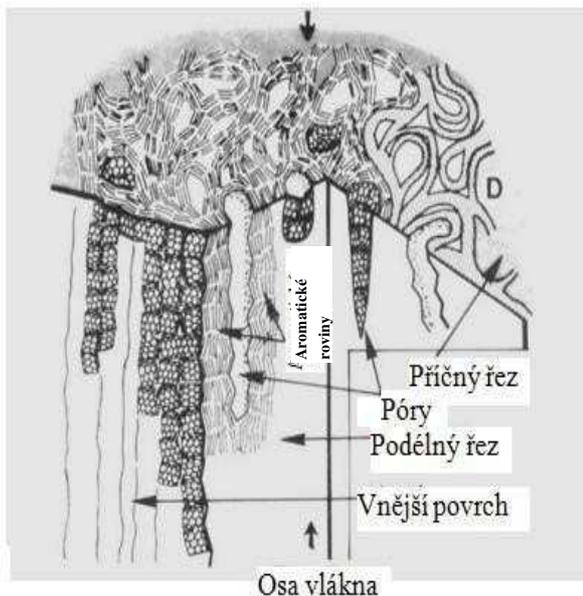
<http://44.206.159.178/FT/200/42291/765300.pdf>

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 větších než 500 °C) a dutá vlákna (vznikají při zvláknování 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“ e 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 velkým teplotám, oxidovaná uhlíková vlákna Pyron<sup>®</sup> od firmy Zoltek a Panox<sup>®</sup> 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 preforem

Společnosti Toray Teijin a Mitsubishi Rayon recyklují uhlíková vlákna v závodě 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>

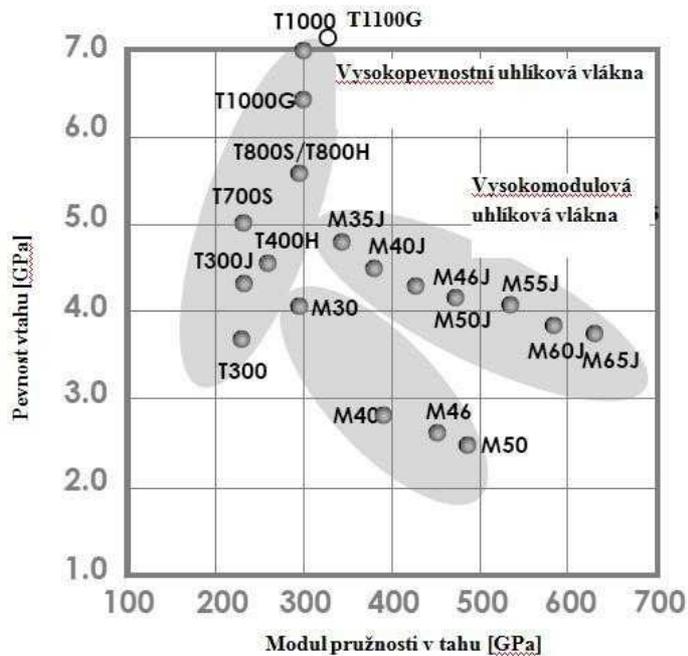
Boeing a Oracle Team USA budou vyvíjet recyklaci uhlíkových vláken při universitě v Nottinghamu (USA) a v Materials Innovation Technologies (USA), aby mohla být použita pro recyklaci vláken z letadel Boeing 787. <http://boeing.mediaroom.com/index.php?s=20295&item=128832>

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 nejtuzší grafitizovaná vlákna nelze považovat za čistě 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 u města Lake City vybudován 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 pevnost.



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

TORAYCA - TYPICAL FIBER PROPERTIES										
FIBER TYPE	Number of Filaments	Sizing Type	Tensile Strength		Tensile Modulus		Elongation %	Yield g/1000m	Density g/cm <sup>3</sup>	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 <sup>1)</sup>	4,5						198		2.0
	6,000 <sup>1)</sup>	4,5						396		2.0
	12,000 <sup>1)</sup>	4,5						800		4.0
T300J	3,000 <sup>2)</sup>	4	611	4,210	33.4	230	1.8	198	1.78	2.0
	6,000 <sup>2)</sup>	4						396		2.0
	12,000 <sup>2)</sup>	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 <sup>3)</sup>	5,6	600	4,140	33.4	230	1.8	1,700	1.79	6.0
T700S	12,000 <sup>3)</sup>	5,6,F	711	4,900	33.4	230	2.1	800	1.80	6.0
	24,000 <sup>3)</sup>	5,6,F						1,650		6.0
T700G	12,000 <sup>3)</sup>	3	711	4,900	34.8	240	2.0	800	1.80	6.0
	24,000 <sup>3)</sup>	3						1,650		6.0
T800H	6,000	4	796	5,490	42.7	294	1.9	223	1.81	2.0
	12,000	4,5						445		4.0
T800S	24,000 <sup>3)</sup>	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	5						450		2.0
M40J	3,000	5	640	4,410	54.7	377	1.2	113	1.77	0.5
	6,000 <sup>1)</sup>	5						225		1.0
	12,000 <sup>1)</sup>	5						450		2.0
M46J	6,000 <sup>1)</sup>	5	611	4,210	63.3	436	1.0	223	1.84	1.0
	12,000 <sup>1)</sup>	5						445		2.0
M50J	3,000	5	597	4,120	69.0	475	0.8	109	1.88	0.5
	6,000	5						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	5						206		0.4
M30S	18,000 <sup>3)</sup>	5	796	5,490	42.7	294	1.9	760	1.73	4.0
M30G	18,000 <sup>3)</sup>	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 <sup>1)</sup>	5						364		1.5
	12,000 <sup>1)</sup>	5						728		4.0

Z dále následujících tabulek je zřejmé, že uhlíková vlákna mají obecně oproti skleněným vláknům menší průměry. Při menším průměru lze totiž vlákna lépe ohnout, takže je lze použít při výrobě tkanin a pletenin, ačkoliv jsou křehčí než skleněná vlákna. Vlákna z uhelných mesofázových smol Dialead od firmy Mitsubishi Plastics se vyrábějí 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 Diaload<sup>®</sup> vyrobených z uhlé mesofázové smoly firmou Mitsubishi Plastics, Inc.

Typ	Průmyslové (12K-16K)		Letecké (2K-6K)			
	K63712	K63A12	K1352U	K1392U	K13C2U	K13D2U
Průměr [ $\mu\text{m}$ ]	10	10	10	10	10	10
Hustota [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	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 [ $10^{-6} \text{ 1/K}$ ] 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<sup>®</sup> vyrobená z ropné smoly firmou Nippon Graphite Fiber Corporation

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

Grade	Filament	Tensile modulus		Tensile strength		elongation %	density g/cm <sup>3</sup>	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



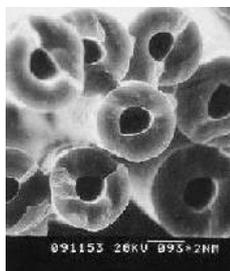
Uhlíkové vlákno Pyrofil™ od Mitsubishi Rayon Carbon Fiber and Composites, Inc.

Typ vlákna	Počet monovláken	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	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

Uhlíková vlákna se vyznačují těmito zvláštnostmi:

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

Izotropní uhelná smola a anizotropní mesofázová smola je také používána <http://www.mercorp.com> k produkci 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 oxidační stabilizace u vlhkého PAN vlákna



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

Průměr dutých uhlíkových vláken (15 a 20 μm) je větší než u obvyklých uhlíkových vláken. Jsou dělány pokusy zpevnit jejich stěnu uhlíkovými nanotrubičkami.

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

### Současní hlavní výrobci uhlíkových vláken

a jejich obchodní značky jsou v 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		PAN
Mitsubishi Plastics	Japonsko	Dialead		Mesofázová smola
Hexcel	USA	HexTow		PAN Mesofázová smola
SGL The Carbon Group	USA Německo	Sigrafil T Sigrafil C  Panox  Recafil		PAN  Tepelně stabilizované oxidované vlákno, používá se například pro výrobu disků brzd letadel  Recyklovaná vlákna jsou pouze krátká s délkou 40 až 100 mm vložky mají vlákna dlouhá 230 mikrometrů
Aldila Výrobce golfových holí. Společnost byla koupena Mitsubishi Rayon Carbon Fiber and Composites, Inc.	USA Uhlíkové dřívky ("Shafts") jsou vyráběny laminací prepregů, navíjením prepregů nebo metrou RTM. kdy pletený polotovár je ve formě zastříknut epoxidovou pryskyřicí			
Cytec Solvay Group	Global Company			PAN, MPP
Fiber Corre Europe	Holandsko			PAN
Technical Fibre Products	UK	Optimat		PAN
Zoltek Companies v roce 2013 byla firma koupena společností Toray	USA	Panex 30 Panex 33 Pyron	Průmyslová vlákna	PAN
DuPont	USA	E-130		(MPP), Mesofázová smola
Dow AKSA	Turecko	Aksaca	Průmyslová 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)		Průmyslová vlákna	PAN
SABIC Produkce v Jižní Koreji u společnosti Hyusung	Saudská Arábie		Je plánován nový závod v SA	PAN

Dalian Xinge Carbon Fiber Co. Ltd	Čína			PAN
Yingyou Group Co.	Čína			PAN
Zhongfu Shenyng Carbon Fiber Co.	Čína			PAN
Gansu HaoShi Carbon Fiber Co.	Čína			PAN
Anshan East Asia Carbon Fibers Co.	Čína			PAN
Yising Huaheng Carbon and Aramid Fiber Product Co.	Čína			PAN
Weihai Tuozhan Fiber Co.	Čína			PAN
Sinosteel Jilin Carbon Fiber Co.	Čína			PAN
Sinosteel Jiangeheng Carbon Fiber Co.	Čína			PAN
Jilin Tangu Carbon Fiber Co.	Čína			PAN
Kemrock Industries	Indie	Jaitec		PAN

**Některé 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.toraycf.com/product.html> (USA)

<http://www.tohotenaxamerica.com/companyphp?info=news>

<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/company/structure/154/> Argon, Rusko)

<http://www.uvicom.com/en/component/content/article/121.html> (Rusko)

<http://en.sinosteel.com/cpyw/cpml/tszp/indexs.html> (Čína)

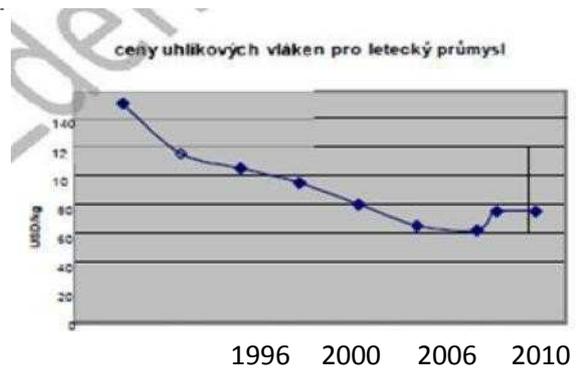
<http://www.kemrock.com/> (Indie)

Americké společnosti Zoltek se podařilo výrobou z levné suroviny (maďarské 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 zpevnování 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](http://www.oxeon.se/uploads/Media/20061106%20Olofsson_Presentation.pdf)

Úsečka v grafu ukazuje rozsah cen uhlíkových vláken. Těžiště úsečky neleží na čáře průměrných cen, protože záleží také na typu vlákna a množství jejich produkce.



V ČR uhlíkové, aramidové, hybridní (uhlík+aramid) a skelné tkaniny, rovingy pásky 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 gelcoatů je možno zakoupit na <http://www.shopmaninc.com/products.html>

Online obchod je také na adrese <http://www.carbonology.com/> Ceny jsou v librách.

### Úprava povrchu uhlíkových vláken

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

- odstranit z povrchu vláken látky bránící kontaktu s matricí.
- omezit další adsorpci plynů 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 uhlíka, karboxylové kyseliny, karbonátové, 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 povrchů vláken vakuovou desorpci
- rozpuštěním adsorbovaných látek v pryskyřici při vhodném režimu vytvrzování
- úpravou povrchu vláken

Nejčastěji se vyrobena vlákna chrání polymerními povlaky na bázi epoxidů nebo polyimidů, 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 zdrsňit. Nejběžnější je mokry způsob, spočívající v čistě chemickém působení oxidačních látek (HNO<sub>3</sub>, chromová kyselina, chlornatan sodný) nebo elektrochemický způsob, spočívající v anodické oxidaci vláken v elektrolýtech. U vláken s příznivější mikrotextrou lze aplikovat i suchý proces termickou oxidací.

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

- leptání a zdrsňování povrchu, doprovázené často i poklesem pevnosti (při použití kyslíku)
- očištění vláken, které vede k zvětšení povrchové energie a k zlepšení smáčivosti pryskyřice
- implantace funkčních skupin na očištěný povrch (při použití čpavku 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 připouštěním čpavku, (případně s atmosférou směsi čpavku a argonu), které vede k téměř dvojnásobnému zvýšení smykové pevnosti rozhraní vlákna a matrice. Plazmatovou polymerací lze vytvořit na uhlíkovém vlákně dobře ulpívající polymerní (např. polypropylenový) povlak a tak dosáhnout afinity k polymerní matrici. Často je po implantaci chemických skupin na povrch vlákna pozorováno zvětšení tahové pevnosti, které je vysvětlováno zahojením povrchových defektů v vytvářeném povlaku.

Na očištěný povrch se mechanicky fyzikálně i chemicky lépe vážou funkční skupiny povlaků nanášených za mokra. Používají se například oligomery na bázi epoxidů nebo polyimidy rozpuštěné v organických rozpouštědlech. Existují také blokové kopolymery, které v hotovém povlaku vytvoří vrstvu s přirozenou 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, např. při namáhání rázem. Vlákna se totiž při lomu snadno vytahují z matrice a nedochází k jejich porušení v rovině šířící se lomové trhliny. Proces vytahování vláken spotřebovává více energie než je energie spotřebovaná na tvorbu lomových povrchů vláken. Pro zvětšení houževnatosti při zachování dobré soudržnosti vláken a matrice je výhodné opatřit vlákna např. přilnavým povlakem kaučuku, který způsobí, že vytahování vláken je doprovázeno větším třením. Pro dobrou únavovou odolnost a velkou statickou pevnost kompozitu jsou však samozřejmě nevratné procesy, odehrávající se v mezifázovém rozhraní vlákno/matrice, nepřijatelné. Poslední dobou se do povlaků přidává nanometrický oxid křemíku-

### Značení uhlíkových vláken

Označení vláken není jednotné, název produktu Tenax Toho začíná 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 počáteční písmeno M.

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

Rovingy a příze z uhlíkových vláken mají značení polotovarů podobně 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>

Jednosměrná a tkaninová 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 IM7, 12K nebo 6K), při kterém dojde k přetržení vláken v jejich slabých místech. Fragmenty zůstávají rovnoběžné, se střední délkou okolo 10 cm. Fragmentovaný svazek vláken (maximální deformace 11 %) je potom opatřen epoxidovou povrchovou úpravou (vodný roztok epoxidu) a navinut na cívku.

U firmy Schappe Techniques (Francie) jsou fragmentovaná vlákna smíšena 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 pramene 50K a druhý z pramene 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 pentakarbonu železa ( $\text{Fe}(\text{CO})_5$ ) působí jako katalyzátory precipitace krátkých uhlíkových nanovláken. Vlákna rostou v parách, proto bývají označována VGCF. Růst tloušťky vláken do mikroskopických průměrů je dosažen další kondenzací par a nánosem pyrolytického uhlíku. Produkt je plynule odebírán z reaktoru, který neobsahuje žádnou pohyblivou část. Přítomnost síry je nezbytná pro rychlý růst uhlíkových vláken. Lze využít práškové sinterované uhlí (částice menší než 60  $\mu\text{m}$ ). Molární poměr síry a katalyzátoru je 1,6. Vlákna jsou vysoce grafitická.

Obvyklý průměr VGCF vláken je od 150 do 200 nm (za nanovláknem 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

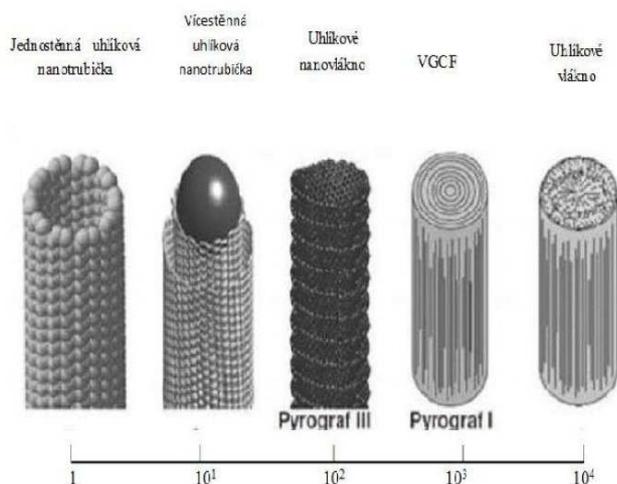
I

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

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

Oblasti aplikací krátkých uhlíkových vláken Pyrograf jsou:

- Vytužení a zpevnění termoplastů
- Zvýšení elektrické vodivosti barev při jejich elektrostatickém nanášení
- 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 Odstraňování statické elektřiny u nádob s pohonnými hmotami
- Elektrody lithiových baterií



### Uhlíková vlákna z nanotrubiček

[http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon\\_nanotube](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 růstem z par prekursoru CNT na substrátu)
- V elektrickém oblouku
- Laserovou ablací grafitu
- Plasmatickou metodou

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

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 větší pevnost, při menší hustotě (nanotrubičky jsou duté, s hustotou od 1330-1400 kg/m<sup>3</sup> u jedностěnných nanotrubiček a 2600 kg/m<sup>3</sup> u vícetěnné nanotrubičky (MWNT, “Multi-Wall CarbonNanotube”)).

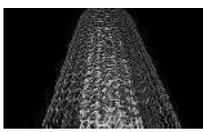
Výzkum přímého spřádání uhlíkových vláken z reaktoru pro syntézu nanotrubiček (zdroj uhlíku a sloučenina železa jako nanokatalyzátor, je prováděn též na univerzitě Cambridge na “Department of Materials Science and Metallurgy” .

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

Vláknno spřádáné z uhlíkových nanotrubiček odtažených z lesa nanotrubiček vyrábí také australská společnost CSIRO.

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

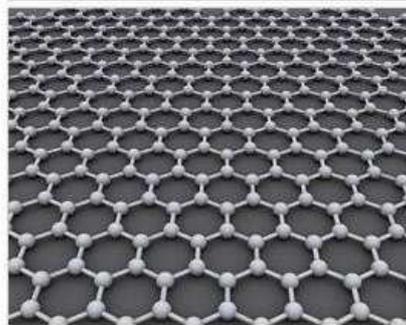




### MWNT

Nanotrubičky mohou mít různé struktury v závislosti na poloze šestistěnu uhlíkových atomů: křesílkovou, cik-cak a chirální. Skutečné uspořádání se však od idealizovaných modelů většinou liší. Plošné uspořádání dává Grafen.

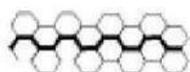
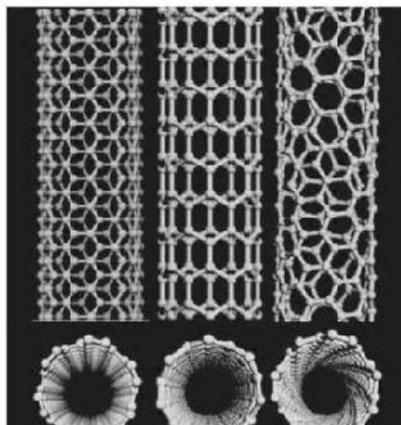
<https://en.wikipedia.org/wiki/Graphene>



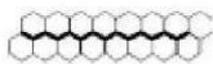
Grafenové nanopásky (GNR ("Graphen NanoRibbons")) se používají k odstranění ledu z listů helikoptér (elektrotepelným efektem).

Existuje také Q uhlík, který je tvrdší než diamant a vyrábí se z amorfního uhlíku (na safírové podložce) pulzy vysoce výkonného laseru, po kterých následuje zakalení. Z Q uhlíku lze vyrábět nano a mikro diamanty, jehlicovité diamanty a diamantový film při běžných teplotách a tlacích.

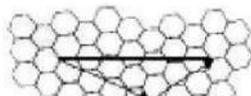
<https://en.wikipedia.org/wiki/Q-carbon>



Křesílková struktura



Cik-cak struktura



Chirální struktura

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

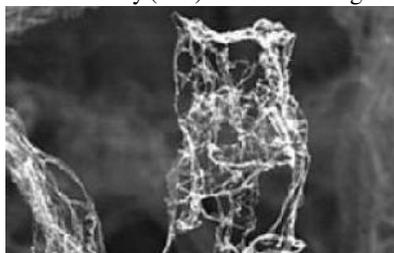
	Modul pružnosti v tahu [TPa]	Pevnost v tahu [GPa]	Prodloužení při přetržení [%]	Hustota ("true") [g/cm <sup>3</sup> ]	Průměr
Jednotěnná nanotrubička SWNT (experiment)	1-5	13-56	16	1,3-1,4	1-2 nm
Jednotěnná nanotrubička SWNT, křesílková struktura (teorie)	0,94	126,2	23		
Jednotěnná nanotrubička SWNT,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

V poslední době se do uhlíkových prepregů přidávají uhlíkové nanotrubičky (prepreg Arovex<sup>TM</sup>), aby se zvětšila lomová houževnatost laminátu (nanotrubičky přemostují trhlinu).

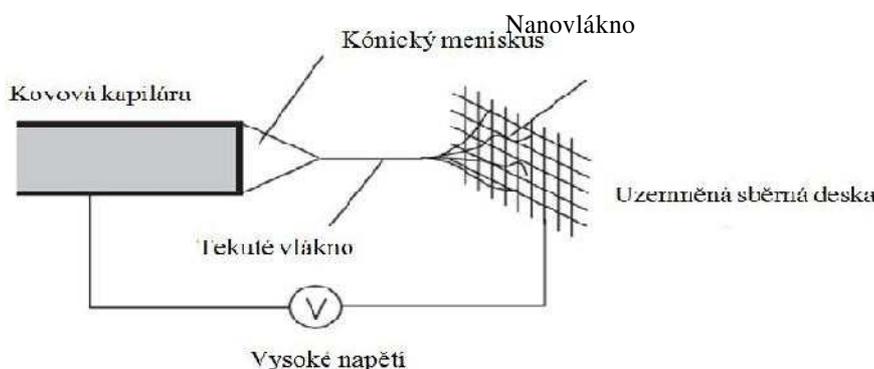
[http://www.zyvexpro.com/performance\\_enoa.html](http://www.zyvexpro.com/performance_enoa.html)

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 pěna). Jeho hustota je  $0,2 \text{ mg/cm}^3$ . Vynuli jej němečtí vědci na Kiel University (KU) a na Hamburg University of Technology (TUHH). Nazvali jej "Aerographite".



Nanovláčna z uhlíkových nanotrubiček se také vyrábějí „elektrozvlákňováním“. V proudu vycházejícím z menisku kapaliny se jednotlivé nanotrubičky orientují ve směru osy nanovláčna. Podstata elektrozvlákňování 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 přímých uhlíkových nanotrubiček existují také "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 průměry 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 nejnoveji i bez kovů:

Vyrábějí se:

- na zeolitové, křemíkové nebo hliníkové podložce metodou CVD (uhlovodíky  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{CH}_4$ )
- 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 např. 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: (viz tabulku na straně 17)

- použití ligninu jako prekursoru uhlíkových vláken (lignin je odpadní surovina při výrobě papíru)  
[http://www.if.ufrj.br/biolig/art\\_citados/lignin-based%20carbon%20fiber.pdf](http://www.if.ufrj.br/biolig/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 (převšim PE-LLD, "Linear Low Density" PE) jako prekursoru (sulfonace je nutná pro zajištění netavitelnosti vlákna).

Sulfonace se provádí se v kyselině chlorsírové ( $\text{HSO}_3\text{Cl}$ ) nebo v kyselině sírové, případně v dýmající kyselině sírové (nebo ve směsi sírový kyselin). Vlákno prekursoru se zesítí (a ztmavne) a vydrží karbonizační teploty ( $900 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Příčný průřez uhlíkového vlákna je dán průřezem zvlákňova trysky vlákna PE. RTG difrakce vlákna po karbonizaci ukazuje na malý podíl krystalické fáze, takže někdy je mluveno o amorfním

uhlíkovém vláknu. <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 Moto Corp. a DaimlerChrysler AG (od roku 2007 Chrysler LLC) vedla k vývoji technologie snižující cenu uhlíkových vláken. ORNL vyvinula novou metod vysokorychlostní oxidace v plasmatu a mikrovlnný ohřev v plasmatu při karbonizaci. Současně byla vyvinuta nová metoda aktivace povrchu uhlíkový vláken, zaručující dobrou vazbu vlákna a matrice.

V programu “Automotive Lightweighting Materials” použila firma Hexcel Co. textilní PAN. Ačkoliv pevnost získaných uhlíkových vláken menší vlivem větší defektnosti prekursoru, jejich modul pružnosti zůstává nezměněný. Pod programem “FreedomCAR” laboratoře ORNL a Pacif Northwest National Laboratory pokračovaly ve vývoji prekursoru na bázi ligninu.

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

Oblasti potencionálního použití uhlíkových vláken na osobním automobilu značky 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 zavázla snížit hmotnost automobilů o 340 kg do roku 2020. V nejbližších letech hodlá vyrábět přední kapoty z uhlíkových vláken. Vývoj nových komponentů probíhá v součinnosti evropského vývojového centra Fordu, ministerstva pro inovace, vědu a výzkum Severních Porýní-Vestfálska, společnosti Dow Automotive Systems, univerzity v Aachen a firem Henkel, Evonik, IKV a Composite Impulse. Výsledkem by měla být sandvičová kapota sestavená z pěnového jádra a CFRP potahů. Časová náročnost 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 vyhovuj

také přísnějším emisním normám a snižuje pokuty za nadprodukcí oxidu uhličitého

#### Poniklovaná krátká uhlíková vlákna

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

Vyrábějí 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 poniklovaným uhlíkovými vlákny. Poniklování se provádí metodou CVD.

Stínění zaručí i levnější vlákna z nerezavějící oceli, ale ta mají pro výztuž polymerů příliš velkou hustotu. Stínění vojenských plavidel z kompozitů (proti pronikání elektrických signálů z lodě) zajistí měděné sítě vložené do stěny trupu.

#### POLYMERNÍ VLÁKNA

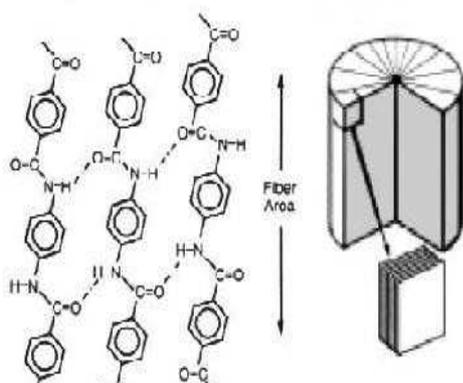
<http://www.etbyu.edu/groups/strong/pages/articles/articles/fibers.pdf>

K největším 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, polyethylen tereftalátová (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 zvětšuje velmi málo (maximálně na hodnoty 5 až 10 GPa u PA, 15 Pa u PET). Kovalentní vazby mezi atomy uhlíku v páteři 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 vyrábějí jiným postupem.

Vychází se buď z roztoků polymerů nebo metodou analogickou dloužení z taveniny při 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>



Nejznámější je Kevlar<sup>®</sup> 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 plasticky 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<sup>®</sup> . společnosti DuPont.  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Nomex>

foto1

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

Kevlar 49 se vyznačuje velkou teplotou měknutí (520 °C) a nevýrazným táním krystalů okolo 600 °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 (tyčinkovité)

makromolekuly tendenci ukládat se paralelně a vytvářet kapalné krystaly. Při toku roztoku kapilárou dochází k paralelnímu uspořádání tyčinkovitých 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 dloužení za tepla, které dále zvýší pevnost a tuhost vlákna.

Struktura vlákna je v důsledku silných mezimolekulárních sil (vodíkové můstky) výsoce krystalická (stupeň krystalinity 95 %). Přítomnost nevysycených 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<sup>®</sup> a v Holandsku od roku 2007 Teijin AramidBV<sup>®</sup> (dříve Twaron BV<sup>®</sup>). Technora má odlišné složení než para-aramid, jde o „poly(parafenylen-3,4-oxidyfenyltereftalamid“.

-----

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

Základní mechanické vlastnosti vybraných typů aramidových vláken uvádí tabulka spolu s údaji o vláknech Nomexu<sup>®</sup> a polyamidu66 (Nylon<sup>®</sup>), které se však pro výrobu kompozitních dílů nepoužívají. Levnější vlákna Nomexu nedosahují mechanických vlastností Kevlaru, ale mají s ním společnou nehořlavost 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 plasticky přetvoří (výroba neprůstřelných vest, ochranných rukavic a oděvů). Mez kluzu v tlaku je nízká, srovnatelná s hodnotami mezi kluzu běžných polymerů. Při případném 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 povrchově 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 matrici. 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 smáčivost vláken epoxidovou pryskyřicí. K dokonalejšímu prošívaní tkanin pomůže i určité procento skleněných vláken nebo přímo použití hybridní tkaniny v níž osnova je aramidová a útek ze skleněných vláken.

Mechanické vlastnosti některých typů aramidových vláken v porovnání se standardním polyamidovým vláknem PA66 (Nylon®).

	Pevnost v tahu [MPa]	Modul E [GPa]	Prodloužení [%]	Hustota [ $\text{g/cm}^3$ ]
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

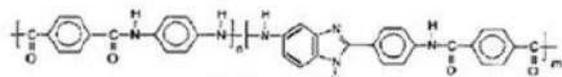
Dnes je na trhu více druhů aromatických polyamidů. Společnost DuPont používá číselné nebo písemné označení jednotlivých typů Kevlaru.

Druhy PPTA od společnosti DuPont:

Typ Kevlaru	Vlastnosti	Použití
Kevlar 29	Modul E menší než sklo	Nejvíce používané vlákno (ochranné oděvy, zpevnění elastomerů, lana, náhrada asbestu)
Kevlar 49		Pevnější než Kevlar 29, větší modul E než skleněná vlákna
Kevlar 149		Pevnější než Kevlar 49, modul E=170 GPa
Kevlar 100		Barevná vlákna
Kevlar 119		Pro zpevnění elastomerů (klínové řemeny, pneumatiky)
Kevlar 129		O 15 až 20 % větší pevnost oproti Kevlaru 29 a o 30 až 35% větší modul než u Kevlaru 29
Kevlar KM2		Pevnost až 3300 MPa. Navržen pro neprůstřelné vesty a vojenské helmy
Kevlar KM2 Plus		Nové vlákno pro neprůstřelné vesty a vojenské helmy
Kevlar 49 AP		Nové vlákno, větší pevnost v tahu než má Kevlar 49, zpevnění a ochrana optických kabelů

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

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

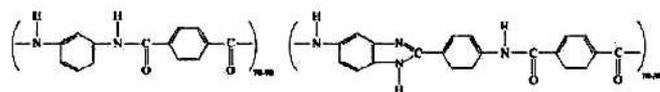


Pevnost Armosu (4 až 5 GPa, je též v grafu na straně 53) je větší než Kevlaru

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

V Rusku byl též vyvinut para-metaaramid pod obchodním označením Tverlana® (vyvinut v ústavu „All-Russian Scientific Research Institute of

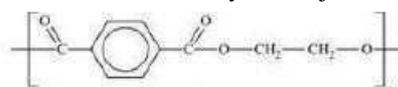
Polymeric Fibers“). Toto vlákno kombinuje velkou tepelnou odolnost para-aramidu s relativní levností meta-aramidu. Strukturální vzorec je:



### Polyethyltereftalátová vlákna (PET)

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

Jsou to vlákna řazená mezi polyesterová vlákna. Chemický vzorec je



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

Polyesterové tkaniny se používají na oděvy, potahy nábytku apod. a vyrábějí se z nich i plachty plachetnic (Dacron®). V oblasti kompozitů se používají tkané i netkané textilie z polyesterů na odsávací a odvětrávací vrstvy při autoklávové a VBM (“Vacuum Bag Molding”) technologii. Obcho dní značka Breatex je na webu

<http://pdf.directindustry.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>

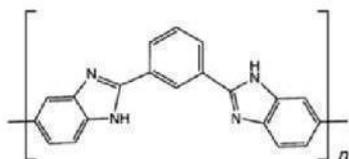
Krátká polyetherimidová vlákna od firmy Engineered Fibers Technology jsou nová vlákna, připravována zvlákněním termoplastu Ultem. Jsou připravována jak rovná krátká (délky 0,5 až 75 mm), tak zvlněná (délky 38-106 mm). Jsou nehořlavá, s velkou tepelnou odolností, nevyvíjejí kouř, s extrémně malou navlhavostí a výbornou barvitelností. 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/Polybenzimidazole\\_fiber](http://en.wikipedia.org/wiki/Polybenzimidazole_fiber)

Jsou to vlákna s velkou tepelnou a chemickou odolností. Nehoří 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

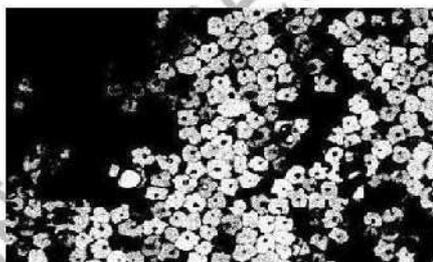
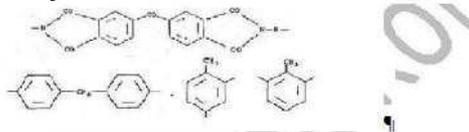
### Polymidová vlákna (PI)

<http://www.evonik.com>

Jsou odolná proti velkým teplotám i chemikáliím. Mají hustotu 1410 kg/m<sup>3</sup>. Používají se pro ochranné oděvy (jsou nehořlavá) 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. Příčný řez vláken je na dalším obrázku (duté vlákna)

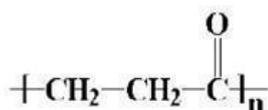


### Polyketonová vlákna (POK)

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

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

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 značku Procon™ vyrábí společnost Evonik. Chemická struktura je:



## Vlákna UHMWPE

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

Velkou měrnou pevnost mají vlákna z polyethylenu s velmi dlouhými makromolekulami, připravená zvláknováním gelu. Jejich výrobu zavedla holandská společnost DSM v roce 1985 pod obchodní značkou Dyneema®. K dispozici jsou typy SK-60 (v matwebu je pod názvem „Tojobo Dyneema“), SK-62, SK-65, SK-71, SK-75, SK-76, SK-78, SK-78 XTM, SK-90 a SK-90 XTM. Největší pevnost, větší o 12 až 15 % než je pevnost vláken typu SK-75 a modul větší 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, zvětšující 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 měkkou 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 orientace makromolekul ve směru osy vlákna by poskytovala vláknu modul pružnosti v tahu až 250 GPa. V kompaktním PE s velkou molekulovou hmotností jsou lamely nebo neuspořádaně propleteny v amorfním podílu. Při dloužení z taveniny je orientace makromolekul omezena vlivem velké hustoty a poměr okolo 5 (dlouhící poměr je dán poměrem délky vydlouženého vlákna k původní délce materiálu). Pro dosažení vysoké pevnosti i tuhosti vláken je nutno rozpustit UHMWPE v některé příbuzné látce (parafinový olej, dekalín, zahřátý parafinový vosk). V roztoku obsahujícím rozpouštědlem, snadno se „rozplétají“ a při toku kapilárou (tryskou) se paralelně uspořádávají. Vlastní tvorba vlákna probíhá při teplotě rozpuštění a opětovného rozpouštění krystalů poskytují roztoku charakter gelu-proto termín „zvláknování gelu“. Vzniká porézní vlákno, které se dále za tepla dluží.

Kromě malé hustoty ( $\rho=970 \text{ kg/m}^3$ , PE plave na vodě) je velkou výhodou UHMWPE též velká korozní odolnost. Nepolárnost polymeru a čistě uhlovodíkový skelet makromolekuly zaručují při normální teplotě odolnost vůči většině chemikálií, s výjimkou silně oxidačně působících roztoků (např. koncentrované kyseliny dusičné a hydroxidu sodného), 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 otěru 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 maticemi. Bez povrchové úpravy je smyková pevnost rozhraní vlákna a např. epoxidové matrice na minimální úrovni (asi 0,8 MPa). Zatímco aramidová vlákna je možno například i leptat, u PE je perspektivní pouze úprava vysokofrekvenčním plazmatem s použitím argonu a přidáváním nízkomolekulárních sloučenin (např. allylaminu). Po optimálním režimu plasmatické úpravy u UHMWPE vláken bylo pozorováno pětinašobné zvýšení smykové pevnosti rozhraní.

Použití vláken UHMWPE v protibalistických aplikacích je velmi výhodné. Nejenže např. neprůstřelné vesty mají lepší schopnost schopnost zastavit letící kulku než vesty z Kevlaru, ale vesty mohou být tenčí, poddajné a lehčí. Vesty nejsou vyrobeny z tkaniny ale z jednosměrně (UD, „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]	Měrná pevnost [N/tex]	Modul [N/tex]	Měrný modul [N/tex]	Prodloužení při přetržení [%]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
Spectra 1000	3000	3	107	100	3,9	970
Spectra 3000	3650	3,76	175	180,4	3,1	970
Dyneema SK-75	3400	3,5	116	116		970
Dyneema SK-90	4000	4	132	132		970
PET	1100	0,797	10,14	10,14	13	1380
PA66	90	0,789	9,385	9,385	13,5	1140

## Vlákna HMPP (vysokomodulová vlákna polypropylenu)

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

Firma **Innegrity, Inc.** (USA) v roce 2006 začala vyrábět polypropylenová vlákna **Innegra™** s dobrou tuhostí a pevností (vlákna **Innegra™ S** a **Innegra™ E** Oproti skleněným vláknům mají mnohem menší hustotu ( $840 \text{ kg/m}^3$ ) a lepší dielektrické vlastnosti (relativní permitivitu 2,2 a ztrátový činitel (tangens ztrátového úhlu) 0,0002 při 1 MHz (zvláště vlákna **Innegra™ E**) a lepší chemickou odolnost. Nové vlákno **Innegra H** je vhodné pro přípravu směsných tkanin v kombinaci s ostatními výkonnými vlákny (tj. uhlíkovými, aramidovými a dalšími). PP bude tvořit matrici vylišaného kompozitního dílu.

Mechanické vlastnosti vláken **Innegra™ S**.

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

Spolu se skleněnými vlákny mohou být tato vlákna používána pro lamináty krytů radarů letadel a lodí a na desky plošných spojů pro vysoké frekvence. Protože houževnatost vláken **Innegra™** je stejná jako u Kevlaru, další potenciální aplikací je výroba lehké protibalistické ochrany

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

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

U samovytuzujících se plastů při toku taveniny v oblastech s velkým gradientem smykových rychlostí (tj. především v povrchových vrstvách proudu)

dochází k orientaci tuhých makromolekul ve směru toku. Stejný postup lze uplatnit i při výrobě vláken. Teplota tání krystalů se pohybuje okolo 300

°C, tavenina má dostatečně malou viskozitu, takže vlákno lze vyrábět zvlákněním taveniny tj. jde o termotropní proces.

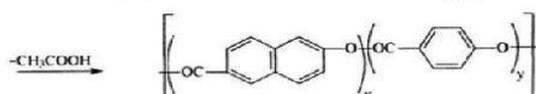
Špičková LCP vlákna jsou vytvořena z aromatických polyesterů Stavba LCP vláken připomíná biologická vlákna, z nichž jsou složeny například šlachy Pro konstrukční aplikace mají tato vlákna velkou tepelnou odolnost a přirozenou afinitu k polymerním maticím. Oproti aramidům jsou LCP vlákna nenavlhavá.

Nejnovější **Vectran EX** je určen pro vysokoteplotní aplikace.

Základní charakteristiky vlákna **Vectran®**

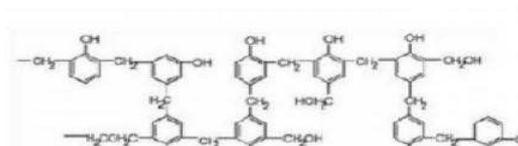
	Pevnost v tahu [GPa]	Modul pružnosti [GPa]
Vectran HS	32	23
Vectran NT	11	52
Vectran UM	3	215
Vectran EX	?	?

Chemický strukturální vzorec vlákna **Vectran®** <http://en.wikipedia.org/wiki/Vectran> společnosti **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 struktuře netavitelné a nehořlavé (ochranné pomůcky), může být použito jako náhrada asbestu pro brzdy a jako prekursory uhlíkových vláken (viz novoloidová uhlíková vlákna) na stránce 21. Chemická struktura **Kynolu®** je:

Vlákno je i vysoce chemicky odolné, protože je tvořeno třírozměrně zesítěným polymerem podobným fenolické pryskyřici. Vlastnosti vlákna jsou uvedeny v tabulce

Barva	zlatá
Průměr [ $\mu\text{m}$ ]	14-33
Hustota [ $\text{g/cm}^3$ ]	1,27
Pevnost v tahu [MPa]	1300-1800
Modul pružnosti v tahu [GPa]	350-450

Prodloužení při přetržení [%]	30-60
Navlhavost při 20°C a 65% RH [%]	6

Z vláken Kynolu je vyráběn také roving, který je po zuhelnatění vhodný pro výrobu kompozitů uhlík-uhlík (uhlíková vlákna, uhlíková

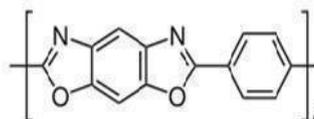
matrice).

### Vlákná PBO

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

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

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



Vlákná 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 <sup>3</sup> ]	1540	1560
Pevnost v tahu [GPa]	5,8	5,8
Modul pružnosti v tahu [GPa]	180	280
Prodloužení při přetržení [%]	3,5	2,5
Navlhavost [%]	2	0,6
Teplota rozkladu [°C]	650	650
Součinitel délkové teplotní roztažnosti [1/K]		-6 * 10 <sup>-6</sup>
Relativní permitivita při 100 kHz		3
Zráťový činitel		0,001

Svou tuhostí vlákna PBO převyšují aramidová vlákna. Modul pružnosti v tahu mají zhruba dvojnásobný (teoreticky až 480 GPa) oproti nejtuzší vláknům aromatických polyamidů, neavlhají, nehoří, při vystavení ohni nemění tvar (PBO se chová jako ablativní materiál, odpařuje se), v ohn vykazují malý vývin kouře a má výbornou odolnost proti abrazi. Cenově jsou PBO vlákna dražší než standardní uhlíková a aramidová vlákna. Výrob neprůstřelných vest z nich ale byla zakázána, protože starší vesty nezajistily nezranitelnost jejich nositelů (během 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](http://www.bsst.de/content/PDF/050.08120002_EN.pdf)

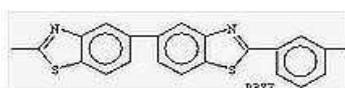
PBO vlákna se mohou stát precursorem uhlíkových vláken, protože jejich chování při karbonizaci je podobné chování PAN. Oproti precursor PAN nevyžadují oxidační stabilizaci a jejich struktura je podobná vláknům z mesofázových smol-v příčném řezu mají krystaly radiální uspořádání.

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

### Vlákná PBZT poly-p-phenylene benzobisthiazolová (poly(benzobisthiazole-2,6-diyl-1,4-phenylene))

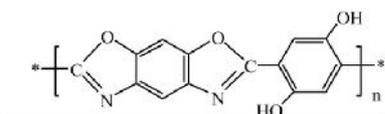
<http://www.che.uc.edu/jmark/PhD%20Dissertations/DANG-THESIS-Final0509.pdf>

Jedná se o vlákna s chemickou strukturou vyznačující se vysokou tuhostí makromolekuly, podobně jako u PBO. Tahová pevnost je 2,2 GPa, modul pružnosti je 224,8 GPa. Vlákna se vyznačují vysokou odolností proti oxidaci (hodí se proto pro použití při velkých teplotách, maximální pracovní teplota je 350 °C) a odolností rozpouštědlům. Podobně jako vlákna PBO teplem neměknou, tepelná degradace nastává při teplotě 600 °C (na vzduchu).



### Vlákná PBOH poly[p-(2,5-dihydroxy)-phenylenebenzobisoxazole

Vlákná mají menší pevnost v tahu než PBO vlákna a co týče teplotní odolnosti, tak je taky nepřesahují, ale oproti nim mají větší axiální pevnost v tlaku (331 MPa). Pevnost v tahu je 6 GPa, modul pružnosti v tahu 155 G/a.

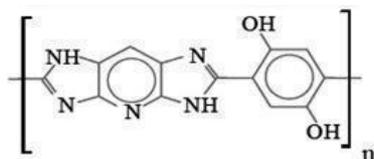


### Vlákno M5 (PIPD)

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

[http://stuff.mit.edu/afs/athena.mit.edu/course/3/3.064/www/slides/Advanced\\_Fibers\\_MRS.pdf](http://stuff.mit.edu/afs/athena.mit.edu/course/3/3.064/www/slides/Advanced_Fibers_MRS.pdf)

Jde o výrobek firem Magellan Systems International a DuPont Advanced Fiber Systems. Vlákno bylo vyvinuto ve společnosti 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, větší modul pružnosti než nízkomodulová uhlíková vlákna z PAN a také měrným modulem (hustota  $1700\text{kg/m}^3$ ) předčí 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).

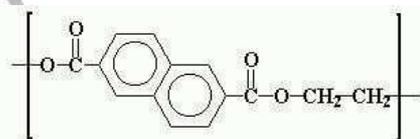
Vlastnosti vlákna M5 jsou uvedeny v následující tabulce.

	M5 dosahované hodnoty	M5 cíl
Pevnost v tahu [GPa]	8,5	9,5
Prodloužení při přetržení [%]	2,5	2,5
Modul pružnosti v tahu [GPa]	300	450
Hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]	1700	1700
Počátek teplotní degradace na vzduchu [°C]	530	530
Navlhavost [%]	2	2

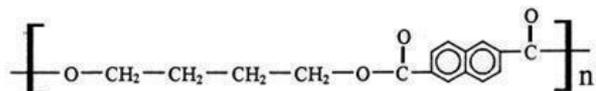
Obecně lze říci, že polymerní vlákna se uplatňují v následujících oblastech: protibalistická ochrana (neprůstřelné vesty, vesty z vláken M5 mají menší hmotnost (o 40 až 50% oproti vestám z Kevlaru)), ochranné oděvy proti ohni, pro konstrukční kompozity, kompozity pro redukcí „viditelnosti“ letadel a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

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

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



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



PEN tuhostí a pevností předčí klasická polymerní vlákna polyamidová a polyesterová (PA6, PA66, PET). Pro lamináty však tato vlákna nejsou vhodná, protože jejich modul pružnosti E (maximálně 30 GPa) je zhruba poloviční než modul skleněných vláken. Je však možná jejich kombinace tužšími vlákny (například uhlíkovými). Jsou levnější náhradou aramidových, PBO a PPD vláken pro výztuž pneumatik (výzkum Allied Signal, Inc.) klínových řemenů a pro plachty plachetnic.

PBN vlákna jsou poddajnější než vlákna PEN díky většímu podílu skupin  $\text{CH}_2$  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 značky Teonex® vyrábí japonská společnost Teijin a u mezinárodní společnosti Performance Fibers jsou vlákna označena jako PenTec™. <http://rtm.marine-technology.org/presentation/pdf>

### ČEDIČOVÁ 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 čediče i technologie používaná v USA odpovídá podmínkám v ruských a ukrajinských závodech, v nichž výroba začala během studené války (vlákna nahrazovala skleněná vlákna typu S v leteckých aplikacích). Čedičová vlákna mají ve srovnání se skleněnými vlákny typu E odlišné složení a vlastnosti. Společnost Mafic v Severní Karolině produkuje čedičová vlákna (pobočka kanadské společnosti Mafic která je globálním dodavatelem čedičových vláken)

Porovnání složení čedičových a skleněných E vláken.

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

Porovnání vlastností čedičových a skleněných vláken

	Čedičové vlákno	Vlákno z E skla
Pracovní teplota pro tepelné izolace [°C]	820	600
Minimální teplota použití [°C]	-260	-60
Teplota tavení [°C]	1450	1400
Teplota skelného přechodu [°C]	1050	825
Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	2750	2600
Pevnost v tahu [MPa]	4840	3450
Modul pružnosti E [GPa]	89	77
Prodloužení při přetržení [%]	3,15	4,7
Součinitel délkové teplotní roztažnosti [10 <sup>-6</sup> 1/K]	5,5	5
Chemická odolnost - úbytek hmotnosti za 3 hod [%] vařící voda/vařící NaOH	0,2/5	0,7/6

## PROTEINOVÁ VLÁKNA (VLÁKNA PAVOUČÍ)

<http://en.wikipedia.org/wiki/Darwin%27sbarkspider>

Vlákna pavouků vynikají velkou houževnatostí (mají velké poměrné prodloužení při přetržení, až o řád větší než vlákna Ke vlaru<sup>®</sup> 49), ale nejsou v potřebném množství dostupná bez genetického inženýrství. Pavouci se nedají hromadně chovat jako bourec morušový, protože jsou agresivní a potřebují ovládat své teritorium.

Transplantací žlázových genů pavouků do mléčných žláz koz bylo dosaženo, že v mléku byly přítomny potřebné proteiny. Vlákenný produkt společnosti Nexia Biotechnologies měl obchodní značku BioSteel<sup>®</sup>. V roce 2009 společnost udělala úpadek. Na universitě Utah State University ("Utah Science Technology and Research Initiative" (USTAR)) <http://en.wikipedia.org/wiki/BioSteel> vyvinutou technologii i nadále používají. Ve výběhu university za tím účelem chovají stádo 30 transgenních koz.

Také transgenní formy larev bource morušového dávají hedvábná vlákna s vlastnostmi pavoučích vláken. Výzkum se provádí na University of Notre Dame a University of Wyoming. Společnost Kraig Biocraft Laboratories, Inc.

<http://www.kraiglabs.com/> vlákna komerčně vyrábí.

Umělá proteinová vlákna se dají také vyředit pomocí metabolicky upravených bakterií Escherichia Coli, které fungují jako hostitelé produkce potřebných aminokyselin. <http://www.sciencedaily.com/releases/2010/07/100727121940.htm>

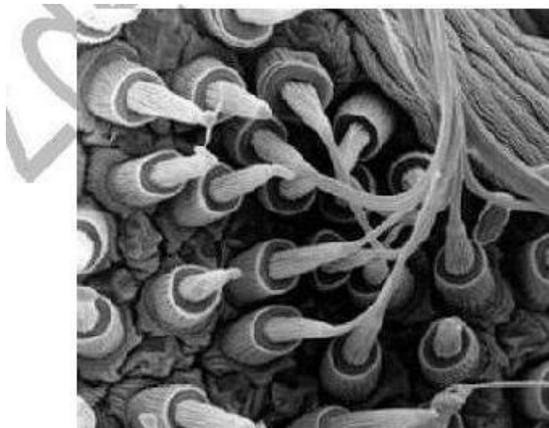
Proteinová pavoučí vlákna jsou biodegradabilní a jsou proto vhodná pro rbyářské vlasce a pro chirurgii jako šicí vlákna.

Při použití na protibalistickou výzbroj je výhodou jak nižší cena vláken, než mají vhodná syntetická vlákna, tak malá hustota (1320 kg/m<sup>3</sup>).

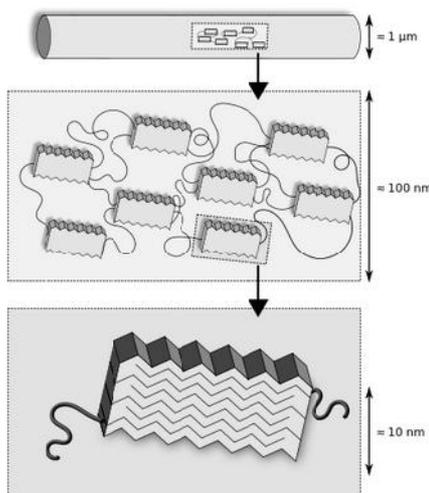
Druh	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost v tahu [GPa]	Prodloužení při přetržení [%]	Spotřebovaná práce [MJ/m <sup>3</sup> ]
Madagarský pavouk „Careocoris darwini Kůrový pavouk, viz odkaz pod názvem kapitoly	1,32	13	1,85	13	400
Pavouk „ <i>Argiope trifasciata</i> “	1,32	10	1,2	30	180
Pavouk „ <i>Nephila clavipes</i> “	1,32	13	0,7-1,2	18-27	130
Hedvábní bource morušového	1,3	5	0,6	18,5	50
Pás (Nylon <sup>®</sup> )	1,14	2-4	0,9	37	80
UHMWPE Dyneema <sup>®</sup> SK-75	0,97	110	3,4	3,3	
UHMWPE Dyneema <sup>®</sup> SK-90	0,97	130	4		
PPTA Kevlar <sup>®</sup> 49	1,44	130	3,4	3	5
PBO Zylon <sup>®</sup>	1,6	270	5,8	3	7
PPID M5 <sup>®</sup>	1,7	350	8,5	1,4	

Z tabuky je patrné, že pavoučí vlákno nemůže pevností ani modulem pružnosti konkurovat syntetickým polymerním vláknům UHMWPE (Dyneema<sup>®</sup> Spectra<sup>®</sup>), PPTA (Kevlar<sup>®</sup>), PBO (Zylon<sup>®</sup>) a PIPD (M5<sup>®</sup>), viz graf .V porovnání s polymerním vláknem Nylon<sup>®</sup> 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 nekrystalický glycin. Pevnost a nenavlhavost (hydrofobnost) vlákna určuje krystalický podíl, velké prodloužení při přetržení zajišťuje amorfní podíl. Vylačování vláken pavouka ze snovacích bradavek pořízené pomocí SEM (“Scanning Electron ZZMicroscopy”) je na prvním obrázku. Struktura vlákna je znázorněna na druhém obrázku.



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



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

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

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

Přidáním vysoce pevných uhlíkových nanotrubiček (CNT, “CarbonNanoTube”) do roztoku, z kterého je vlákno vyráběno, 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 získají 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](http://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_layer_deposition)

## PŘÍRODNÍ VLÁKNA Z ROSTLIN

Organická přírodní vlákna jsou získávána z pěstovaných rostlin. Hodnoty hustoty, pevnosti, tuhosti a poměrného prodloužení při přetržení uvádí následující tabulka.

Vlákna	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	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>Chorchorus</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 listů Agave sisalana)	1,33	0,507-0,855	9-28	2-3
Henequen (vlákna z listů 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 ořechy ("Coir"), vlákna plodů	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 plodů 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
Kopřiva dvoudomá (Urtica dioica), vlákno žahavé kopřivy	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.jecomposites.com/news/composites-news/high-performance-natural-fibres>

\*\* Údaj o značně velké pevnosti vlákna kopřivy dvoudomé byl převzat z [http://extra.ivf.se/eccm13\\_programme/abstracts/203.pdf](http://extra.ivf.se/eccm13_programme/abstracts/203.pdf)

Údaje o francouzských odrůdách lnu viz práce F. Desting a kol. Comparison of Morphological and Mechanical Properties of Seven Varieties of Flax Fibres, přednesené na 18<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials.

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

Kromě uvedených rostlin se používá cukrová třtina (Saccharum officinarum), ananas, Curauá (Ananas erectifloius), Isora (Helicteres isora), Sansevieria cylindrica (čeled'Agavaceae), Piassava (Attalea funifera), Bagasse (Sugercane) a další,

Přírodní vlákna jsou používána pro výztuž dílů osobních automobilů. Následující obrázek ukazuje použití těchto dílů u Mercedesu 5. Pro zlepšení adheze vlákna a matrice jsou například vlákna lnu povrchově 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 většinou nepolární matricí je nutné nepolární matrici modifikovat polární složkou, u polypropylenu obvykle maleinanhydridem.

Použití rostlinných vláken v termoplastech přináší tyto výhody:

- jedná se o levnou výztuž s malou hustotou
- dochází k úspoře polymeru
- použitím výztuže z přírodních vláken klesne cena výrobku.
- je možno zkrátit výrobní cyklus (kompozit má větší tepelnou vodivost než samotný plast)
- odpad je recyklovatelný
- výztuž je biodegradabilní
- povrch výrobku má přírodní vzhled
- vlákna nezpůsobují opotřebení činných dílů zpracovatelských strojů (šneků, tavné komory a formy)

Vlastnosti PP kompozitu s přírodními vlákny

Přírodní vlákno	w <sub>f</sub> [%]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
Juta	5	73	8,5
Sisal	5	60	6,0
Dřevo smrkové	5	39	5,5
Čistý PP	0	32	1,7

Vlastnosti PEHD kompozitu s přírodními vlákny

Přírodní vlákno	w <sub>f</sub> [%]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]
Juta	5	26	3,0
Sisal	5	21	2,1
Dřevo smrkové	5	14	2,0
Čistý PEHD	0	0,12	0,12

V Mississippi State University vyvinuli metodu zpevnění vláken kenafu nanočásticemi CaCO<sub>3</sub>. Jde o vlákno z hibiscus cannabinus - ibišku konopovitého. Nanočástice vykrystalizují z roztoku CaCl<sub>2</sub> a Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> v mikropórech vlákna. Kompozity s vlákny kenafu mají polypropylenovou matici nebo matici na bázi bioplastu z polymléčné kyseliny (polylaktid, PLA), která je též termoplastická.

Společnost Procotex SA (Belgie) <http://www.compositesworld.com/products/low-density-flax-fiber-prepregs> vyrábí jednosměrné prepregy s přírodními vlákny. Tyto tzv. „eko-kompozity“ s reaktoplastickou nebo termoplastickou maticí mají menší hustotu než kompozity se skleněnými 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 koberečky a zvukové izolace automobilů.

Závod v USA pro produkci kompozitů vyztužených dřevem a přírodními 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 předností je oproti skleněným vláknům malá hustota. Vlákna jsou používána i k výrobě tkanin, které jsou snadno impregnovatelné standardními procesy mají dobrý vzhled v porovnání s tkaninami z jiných přírodních vláken a dovolují snadnou manipulaci a řezání. Vlákna jsou biodegradabilní a mají dobrou kompatibilitu s bio-pryskyřicemi.

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

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

Společnost BASF vyrábí pro automobilový průmysl kompozit s reaktivní akrylátovou maticí Acrodur® (jde o vytvrditelnou vodnou disperzi), která je vyztužena především rostlinnými vlákny a některé typy i netkanou skleněnou 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](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 zaměřena na bioplasty.

Společnost Bo-NaFaTec GmbH & Co. KG Naturfasertechnologie <http://www.bonafatec.com/eng/produkte01.htm> produkuje rohože z rostlinných vláken, zabudované v termoplastické maticí (pro automobilový průmysl, Obchodní značky jsou: Lignoflex™, Lignoprop-PES®, Boflex+®, Bo-NaFaFlex®, Bo-NaFaPlate®).

Další společností specializovanou na použití přírodních vláken na kompozity pro automobilový průmysl je: <http://greencorenc.com/index.htm> (Kanada).

## PŘÍRODNÍ JÁDRO SENDVIČŮ-BALZA

[http://en.wikipedia.org/wiki/ochroma\\_pyramidale](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 buňkami, které jsou vyplněny vodou. Stěny buněk jsou tvořeny vlákny celulózy a hemicelulózy v ligninové maticí (lignin má třírozměrnou strukturu, nejedná se o lineární polymer). Tento přírodní kompozit má hustotu 40 až 340 kg/m<sup>3</sup> (obvykle 160 kg/m<sup>3</sup>). Balzové dřevo nehoří, jen pomalu doutná. Oproti polymerním pěným teplem neměkne a vyznačuje se menší tepelnou vodivostí. Oproti voštinám (“honeycomb”) jsou buňky uzavřené, takže například sendvičové panely (viz Historie (torpédoborec Zumwalt)) lze vyrábět technikou infuze pryskyřice.

## PŘÍRODNÍ MINERÁLNÍ VLÁKNA

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

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

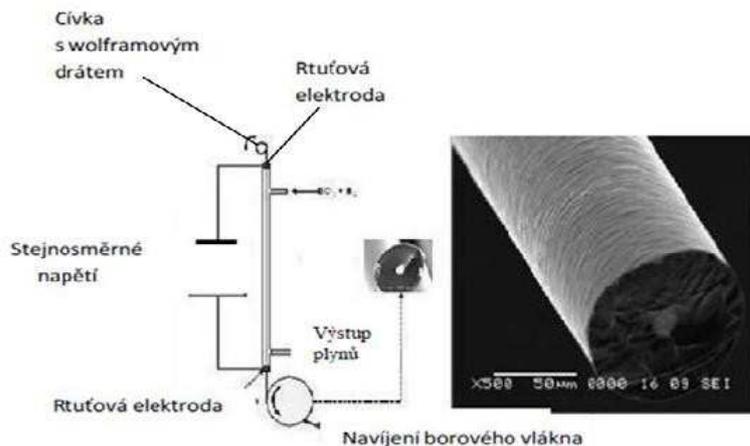
Jsou pouze krátká (diskontinuální). Vláčna chryzotilu (serpentin, bílý azbest) jsou zvlněná, ohebná a mají tendenci tvořit shluky. Chryzotil má vzorec  $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ , hustotu  $2,56 \text{ g/cm}^3$ , modul  $E=160 \text{ GPa}$  a pevnost v tahu  $3,1 \text{ GPa}$ . Zbývajících pět typů azbestu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

Všechny typy azbestu jsou však již několik desetiletí ze zdravotních důvodů vyloučeny z používání vzhledem k prokázané karcinogenosti 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 nanášením tenké vrstvičky SiC (vlákna Borsic<sup>®</sup> nebo BC. Borová vlákna byla první vlákna, která při pevnosti v tahu  $3,45 \text{ GPa}$ , hustotě  $2,5 \text{ g/cm}^3$  dosahovala modul pružnosti  $400 \text{ GPa}$ . Nyní mají pevnost  $3660\text{--}4000 \text{ MPa}$ , modul  $400 \text{ GPa}$  a hustotu  $2380 \text{ g/cm}^3$ . Oproti ostatním vláknům mají borová vlákna velký průměr ( $10^2 \text{ \mu m}$ ) a mají větší 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 přivádí chlorid boritý. Při teplotách kolem  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  se  $\text{BCl}_3$  rozkládá na plynný bor a páry HCl. Wolframový drát o průměru  $12 \text{ \mu m}$  se zahřívá průchodem proudem (drát pochází rtuťovými elektrodami). <http://specmaterials.com/boronfiber.htm> Dříve se používalo pouze wolframové vlákno, nyní také levnější a lehčí uhlíkové vlákno, připravené z izotropní smoly. Borová vlákna se většinou 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. K dispozici je také HyBor<sup>®</sup>, 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<sup>®</sup> se 100 vláknýnych stojí  $660 \text{ \$/kg}$ , prepreg HyBor<sup>®</sup> s 208 vláknýnych je za  $1200 \text{ \$/kg}$ . Hlavní oblastí aplikace je zesílení (zpevnění) konců tlakem namáhaných prvků, výroba dílů s velmi malou tepelnou roztažností a malou roztažností, způsobenou vlhkostí.



### Keramická vlákna

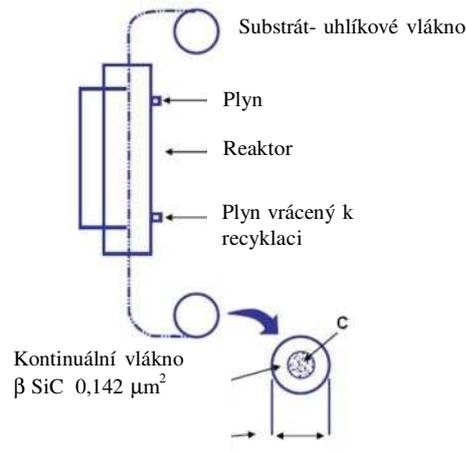
<http://www.napedu/openbookphp?recordid=6042&page=6>

Oproti uhlíkovým a polymerním vláknům mají keramická vlákna větší hustotu (průměrně okolo  $3 \text{ g/cm}^3$  u  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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 prekurzorů. Podstata výroby je na následujícím obrázku



Jsou relativně levná (cca 220 \$/kg), protože výchozí suroviny (organosilan) jsou dostupné ve větším množství slouží i pro jiné účely). Vlákna jsou používána pouze s kovovými, keramickými nebo uhlíkovými matricemi (Ceracarb<sup>®</sup>, firma Hitco Carbon Composites) na speciální součásti pro letecký průmysl a pro výrobky pracující za vysokých teplot. Whiskery SiC jsou vhodné k vztužování 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.

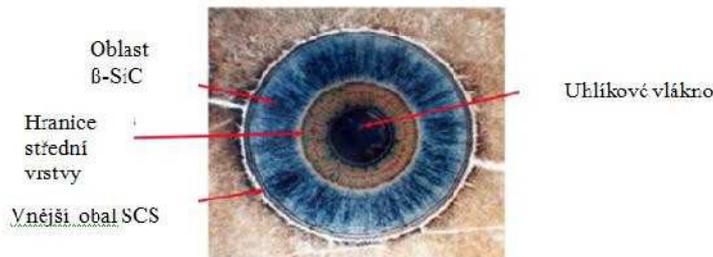
Při CVD výrobě je do reaktoru vhněten silan obsahující uhlík (např.  $\text{CH}_3\text{SiCl}_2$ ) a jako substrát je použito uhlíkové vlákno. Takto vyrobené vlákno má velký průměr.

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  $\text{Si}_3\text{N}_4$  jsou SiC vlákna opatřena ovlakem nitridu boru (BN) pro zvýšení jejich tahové pevnosti.

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

#### SCS-6



Vlastnosti SiC:  
 průměr 140  $\mu\text{m}$   
 pevnost v tahu 3450 MPa  
 modul pružnosti 400 GPa  
 hustota 3 g/cm<sup>3</sup>

Typickým vláknem s malým průměrem, vyrobeným z polymerního prekursoru, je Nicalon<sup>®</sup> 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 něho 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  $\mu\text{m}$  vzniknou malé (asi 2 nm) krystalky  $\beta$ -SiC.

Vlákno netvoří jen SiC, protože zbytek kyslíku vytváří  $\text{SiO}_2$ . Typické složení Nicalonu je 59 % Si, 31% C a 10% O. Hi-Nicalon<sup>®</sup> je opatřeno povlakem BN nebo povlakem BN/SiC. SiC vlákno vyrábí také COI Ceramics, Inc. (USA) pod obchodní značkou Sylramic<sup>®</sup>

Podobným druhem vlákna je Tyrano<sup>®</sup> od japonské společnosti UBE Industries, které je polykrystalický SiC, obsahující malé množství hliníku. Vlákno Tyrano SA<sup>®</sup> má malou ztrátu hmotnosti při teplotě 2200 °C. Vlákno Tyrano<sup>®</sup> 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).

#### $\text{Al}_2\text{O}_3$ kontinuální vlákna

$\text{Al}_2\text{O}_3$  má vysoký bod tání (>2000 °C) a relativně malou viskozitu po roztavení.

Hlavní metody výroby vláken jsou:

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

- z vláknového polymerního prekursoru.

Japonská společnost Sumitomo vyrábí vlákna  $Al_2O_3$  pod obchodní značkou Alteex.

Modifikace  $\alpha-Al_2O_3$  má maximální teplotu použití  $900^\circ C$ . Modifikace  $\eta-Al_2O_3$  zatím používána není, vlákno by však mělo nejmenší hustotu. Vlákno  $\delta-Al_2O_3$  může být použito do teplot  $1600^\circ C$ . Pro výztuž kovových matic jsou dnes používána především vlákna  $\delta-Al_2O_3$ . Vlákna s převahou  $\alpha-Al_2O_3$ , opatřená povlakem SiC, mohou dosahovat pevnosti v tahu až  $19000 MPa$  a mají velkou odolnost proti abrazi.

Metodou sol-gel se vyrábějí také diskontinuální vlákna dlouhá  $0,5 m$ , s průměrem  $3 \mu m$  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<sub>3</sub>N<sub>4</sub> vlákna

Také tato vlákna lze z polymerního prekursoru vyrábět kontinuální. Častější je ale příprava whiskerů  $Si_3N_4$ . Výchozím produktem může být prášková směs nerostu Sepiolitu ( $Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$ ) a polyakrylonitrilu. Při pyrolýze prášku při teplotě  $1350^\circ C$  vznikají whiskery  $Si_3N_4$  (firma Tateho Chemical Industries Co.) Whiskery  $Si_3N_4$  jsou elektricky nevodivé a odolné proti opotřebení

### Diamantová vlákna

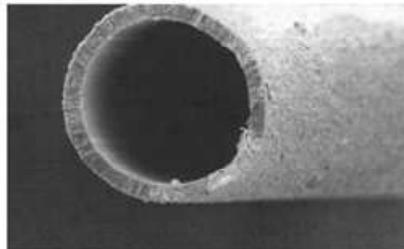
<http://mole.chm.bris.ac.uk/pt/diamond/pdf/mst10-505.pdf>

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

Vyrábějí 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 vhná  $CH_4/H_2$ . Diamantová vlákna mají velkou tepelnou vodivost, asi 4 až 5 větší než měď.

Vyrábějí 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 značkových keramických vláken



Typ vlákna	Chemická složka	Průměr (μm)	Teplota (°C)	Modul pružnosti (GPa)	Pevnost (GPa)	Hustota (g/cm³)
Alteex	$Al_2O_3$	10-20	1600	190	10	3,9
Saffil	$Al_2O_3$	10-20	1600	190	10	3,9
Safimax	$Al_2O_3$	10-20	1600	190	10	3,9
Nextel 610	$Al_2O_3$	10-20	1600	190	10	3,9
Nextel 720	$Al_2O_3$	10-20	1600	190	10	3,9
SiC	SiC	10-20	1600	190	10	3,3
SiN	$Si_3N_4$	10-20	1600	190	10	3,3
AlN	AlN	10-20	1600	190	10	3,4
SiC/SiN	SiC/SiN	10-20	1600	190	10	3,3
SiC/AlN	SiC/AlN	10-20	1600	190	10	3,3
SiC/SiN/AlN	SiC/SiN/AlN	10-20	1600	190	10	3,3
SiC/SiN/AlN/SiC	SiC/SiN/AlN/SiC	10-20	1600	190	10	3,3
SiC/SiN/AlN/SiC/AlN	SiC/SiN/AlN/SiC/AlN	10-20	1600	190	10	3,3
SiC/SiN/AlN/SiC/AlN/SiC	SiC/SiN/AlN/SiC/AlN/SiC	10-20	1600	190	10	3,3

**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 oxidů olova, zirkonia a titanu (Pb, ZrO<sub>2</sub>, PbTiO), která umožňují výrobu „chytrých“ kompozitů.

Piezoelektrický materiál se chová tak, že

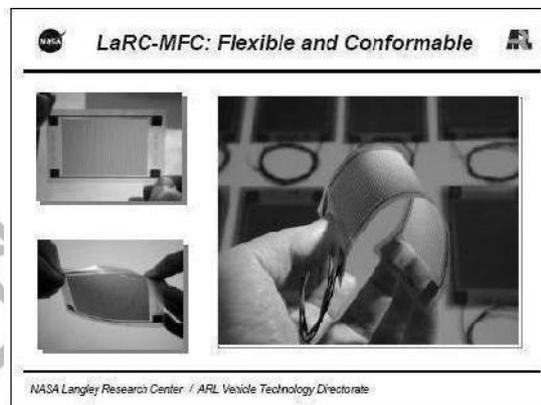
- při mechanickém namáhání vytváří elektrický náboj
- v elektrickém poli mění rozměry

Americká společnost Advanced Ceramics, Inc. vyvinula levnou technologii pro výrobu ohebných keramických piezoelektrických vláken. Tato vlákna jsou použita nejen v „chytř“ sportovní výzbroji, ale i v kompozitních dílech, v nichž se mohou uplatnit jako vlákna aktuátorů (měničích tvar dílu) a jako senzory (měřiče) zatížení. Aktuátory s PZT vlákny jsou o 35% lehčí než konvenční piezoelektrické aktuátory z monolitického PZT. Vlákna PZT jsou vyrobena procesem “Viscose Suspension Spinning Process” (VSSP). Vodní suspenze práškových oxidů olova, zirkonu a titanu je smíchána s viskózou (xanthogenátem celulózy), rozpuštěnou v NaOH. Směs je vyláčena tryskami (100 až 1000 otvorů o průměru 50 až 900 μm) do roztoku speciální soli. Chemickou reakcí se celulóza regeneruje a sůl zároveň dehydratuje vlákno. To je potom spékáno (sintrováno). U kompozitů je vlákno s cyklicky proměnným průřezem velmi dobře mechanicky zakotveno v polymerní matici. Existuje 17 typů vláken. Rozsah průměrů 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/m<sup>3</sup>.

PZT aktuátory jsou používány v letectví, aby umožnily změnu tvaru (u vrtulníků se s jejich použitím dosáhne změna 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 převáděn do elektronického zařízení (mikroprocesoru) v rukojeti rakety. Elektrická energie je nejdříve „skladována“ a s určitým zpožděním zase uvolněna zpět do PZT vláken, aby způsobila 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 zvětšit 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.



Snímače na piezoelektrické bázi mohou monitorovat „zdraví“ konstrukce podobně jako optická vlákna (mohou být zabudovány unitř vláknových kompozitů).

Speciální případ užití piezoelektrických vláken je jejich zabudování do kompozitních bójí, které mechanickou energii vln převádějí na elektroluminiscenční světlo.

## WHISKERY (BEZDEFEKTNÍ MONOKRYSTALY)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Monocrystalline\\_whisker](http://en.wikipedia.org/wiki/Monocrystalline_whisker)

Základním znakem whiskerů je to, že jsou to monokrystaly ve tvaru krátkých vláken a při velmi malém průměru mají vysoký štíhlostní poměr.

Významným znakem whiskerů je velká pevnost, způsobená minimem mřížkových poruch. Whiskery mohou být:

- kovové (čisté kovy) nebo sloučeniny kovů
- keramické (oxidy  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , karbidy  $\text{SiC}$ , nitridy  $\text{Si}_3\text{N}_4$ )
- uhlíkové

Největší význam pro keramické matrice mají whiskery keramické, tj.  $\alpha$ - $\text{SiC}$  a  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

Druhy mřížek  $\text{SiC}$  whiskerů jsou:  $\beta$ - $\text{SiC}$  kubická mřížka,  $\alpha$ - $\text{SiC}$  hexagonální mřížka ( $\text{SiC}$  je intermediární fází diagramu  $\text{Si-C}$ ).

Výroba whiskerů spočívá v katalyticky podporované kondenzaci přesycených par na podložce (metoda VLS, "Vapor-Liquid-Solid") nebo pyrolýzou prekursů. U  $\text{SiC}$  whiskerů jsou to polykarbosilany. Nejlevněji se vyrábějí whiskery  $\text{SiC}$ , když prekursorem jsou rýžové slupky. V prvním stupni se vařením slupek odstraní prchavé podíly. Potom následuje oxidace při teplotě  $700^\circ\text{C}$ . Při teplotách  $1500$  až  $1600^\circ\text{C}$  v inertním nebo redukčním prostředí se vytvoří  $\text{SiC}$  podle rovnice  $3\text{C} + \text{SiO}_2 = \text{SiC} + 2\text{CO}$ . Produkt je potom znovu ohřát v oxidační atmosféře na  $800^\circ\text{C}$ , aby se odstranil volný uhlík. Výťažnost  $\text{SiC}$  whiskerů je asi 5 až 10 %, zbytek pyrolýzy slupek tvoří deskovité částice  $\text{SiC}$ . Takto získané  $\text{SiC}$  whiskery obsahují na povrchu určitý podíl  $\text{SiO}_2$  a uhlík.

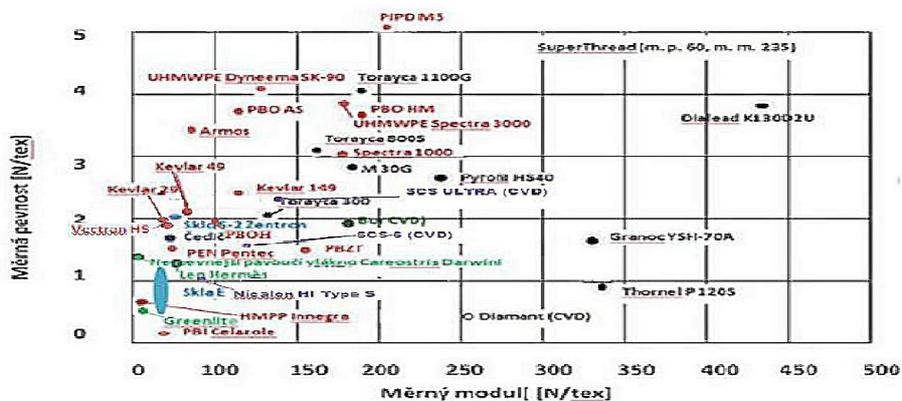
Přehled některých komerčních whiskerů a jejich vlastnosti udává následující tabulka.

Složení whiskeru	Obchodní značka	Průměr [ $\mu\text{m}$ ]	Délka [ $\mu\text{m}$ ]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul E [GPa]	Součinitel délkové teplotní roztažnosti [ $10^{-6}/\text{K}$ ]	Hustota [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Saffil	3,0		2000	310		3,3
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Nextel	3,5		1720	152		3,1
$\text{SiC}$	Tokawhisker	0,1-0,5	30	3000-14000	400-700	4,5	3,18
$\text{SiC}$	Silar SC-9	0,5-0,6	10-80	6900	690	4,5	3,18
$\text{SiC}$	Silar SC-10	0,6	10-80	6900	690		3,18
$\text{SiC}$	Tokamax	0,1-1	50		600	4,5	3,18
$\text{SiC}$	SCW-1	0,05	10-40		600	4,5	3,18
$\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$	SN-WB	0,2-0,5		až 14000	385		3,18

$\text{SiC}$  whiskery malého průměru (pod  $1\ \mu\text{m}$ ) jsou dobře ohebné a velmi pevné, takže se smykovými silami v slinované keramické matici téměř neporušují (na rozdíl od krátkých skleněných a uhlíkových vláken). Vdechnuté whiskery mají karcinogenní účinek, jejich fyzikální účinek v tkáni plic je podobný jako u úlomků vláken azbestu.

Whiskery lze použít i u kompozitů obsahujících kontinuální vlákna. U laminátů totiž zvyšují mezilaminární pevnost (na prepreg se nastříká suspenze whiskerů v izopropylalkoholu). Whiskery ze sloučenin kovů vyráběné japonskou firmou Shikoku mají vlastnosti uvedené v následující tabulce. Jedná se o aluminium boráty

whisker Alborex	
Chemické složení $9(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{B}_2\text{O}_3)$	Délka 10-30 $\mu\text{m}$ Průměr 0,5-1 $\mu\text{m}$
Hustota 3,0 $\text{g}/\text{cm}^3$ Obsah vody 0,5% maximálně Tvrdost Mohsovy stupnice 7 PH 5,0-7,5	Bod tání $1420$ - $1460^\circ\text{C}$ Pevnost v tahu 8000 MPa Modul pružnosti v tahu 400 GPa Součinitel délkové tepelné roztažnosti $4,2 \cdot 10^{-6} / \text{K}$



Výchozí pevnosti v tahu a moduly E a hustoty byly zjištěny při pokojové teplotě. Pomocí tex je posuzována jemnost vláken (také bývá nazývána délková hustota (lineární hustota)). [http://en.wikipedia.org/wiki/Units\\_of\\_textile\\_measurement](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 permitivita a ztrátový činitel 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.torayca.com/>

Uhlíková vlákna Thorne! jsou na webu

<http://www.matweb.com/search/GetMatlsByTradeName.aspx?navletter=Ttn=Thorne!%C2%AE> Uhlíková

vlákna ze smoly Dialead jsou na webu <https://www.mrc.co.jp/dialead/english/> Uhlíková

vlákna Granoc jsou na webu

<http://www31.ocne.jp/~ngf/english/product/p1.htm>

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

Polyethylen tereftalátová, polyimidová, polyketonová, polyarylenetherketonová, polyetherimidová a polyfenylensulfidová vlákna nemohla být do grafu zakreslena, protože nebylo možno zjistit jejich modul pružnosti v tahu. Navíc, výma polyesterů 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 neprůstřelné vesty a pro panely SpectraShield™ (polymerní laminát obsahující křížově vrstvené jednosměrné vrstvy vláken Spectra 3000 a keramické destičky z karbidu boru (B<sub>4</sub>C).

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

Vlastnosti vlákna SuperThread™ (viz Uhlíkové nanotrubičky, strana 30) odpovídají kroucenému vlákně o průměru 3 μm, spřádánému z jednotlivých nanotrubiček (m.p. znamená měrná pevnost, m.m. měrný modul). Měrná pevnost je tak velká, že v daném souřadnicovém systému polohu vlákna nelze zobrazit.

Do grafu bylo přidáno nejužší uhlíkové vlákno Pyrofil HS40, ruský aromatický kopolyamid Armos, diamantové vlákno, LCP vlákno Vectran HT, vlákno PBZT, PBOH a vlákna SCS (keramická vlákna křemíkouhlíková).

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



V ČR jsou kultivary lnu na webu

[http://www.sempra.cz/lng/eng/fibre\\_flax.htm](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  $\text{kg/m}^3$ . 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  $1760 \text{ kg/m}^3$ . Pevnost v tahu je tedy 3530 MPa.