



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

KOMPOZITNÍ MATERIÁLY NA BÁZI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

CARBON FIBRE COMPOSITE MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Martin MIKULA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Karel NĚMEC, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Mikula

který/která studuje v bakalářském studijním programu

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken

v anglickém jazyce:

Carbon Fibre Composite Materials

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracování přehledu o kompozitních materiálech na bázi uhlíkových vláken a následné vyhodnocení výhod a nevýhod těchto materiálů pro aplikace v leteckém průmyslu.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Obecná charakteristika kompozitních materiálů
- 2) Rozbor kompozitů na bázi uhlíkových vláken
- 3) Aplikace kompozitů na bázi uhlíkových vláken v leteckém průmyslu

Seznam odborné literatury:

- 1) LEGENDRE, A. Uhlíkové materiály: od černé keramiky k uhlíkovým vláknům. Vyd. 1. Praha, Informatorium, 2001, 173 s. ISBN 80-86073-82-3
- 2) Ptáček, Luděk. Nauka o materiálu. II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3
- 3) Kratochvíl, B.; Švorčík, V.; Vojtěch, D.. Úvod do studia materiálů. Praha: VSCHT, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4
- 4) Chung, Deborah D. L. Composite materials: functional materials for modern technologies. London: Springer, 2003. 289 s. ISBN 185233665X

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Němec, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 31.10.2011

L.S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

V první části bakalářské práce je obecné seznámení s kompozitními materiály. Kompozitní materiály jsou zde rozděleny podle druhu matrice a vláken a popsána jejich výroba. Druhá část se podrobněji zabývá kompozitními materiály na bázi uhlíkových vláken. V třetí části práce je popsána aplikace kompozitních materiálů v leteckém průmyslu.

Klíčová slova

Kompozit, matrice, výztuž, vlákno, uhlík,

ABSTRACT

In the first part of a Bachelor's work there is a general introduction with composite materials. These materials are separated on the basis of matrix kind. The production of composite materials is described as well. The second part is focused on the carbon fibre materials in more detail. The application of composite materials in aviation industry is in the third part of the Bachelor's work.

Key words

Composite, matrix, reinforcement, fiber, carbon,

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MIKULA, Martin. *Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken*. Brno 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 63 s. Vedoucí práce Ing. Karel Němec, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Martin Mikula

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Karlu Němcovi, Ph.D. za vstřícný přístup, odbornou pomoc a věcné připomínky, které mi pomohli vypracovat tuto bakalářskou práci. Dále bych chtěl poděkovat firmě COMPOSITE AIRPLANES s r.o. za umožnění návštěvy jejich firmy a své rodině a přátelům za velkou podporu během studia na vysoké škole.

OBSAH

| | |
|---|----|
| ABSTRAKT..... | 5 |
| PROHLÁŠENÍ | 7 |
| PODĚKOVÁNÍ..... | 9 |
| OBSAH..... | 11 |
| ÚVOD..... | 13 |
| 1 Úvod do kompozitních materiálů | 15 |
| 1.1 Charakteristika kompozitních materiálů | 15 |
| 1.2 Matrice kompozitních materiálů | 16 |
| 1.3 Výztuže | 17 |
| 1.3.1 Částicové výztuže..... | 18 |
| 1.3.2 Vlákenné výztuže..... | 18 |
| 1.4 Technologie výroby kompozitových dílů..... | 22 |
| 1.4.1 Ruční kladení..... | 22 |
| 1.4.2 Stříkání | 22 |
| 1.4.3 Lisování | 23 |
| 1.4.4 Vysokotlaké vstřikování | 24 |
| 1.4.5 Vakuové prosycování | 25 |
| 1.4.6 Tažení (Pultruze)..... | 25 |
| 1.4.7 Navíjení | 26 |
| 1.4.8 Odstředivé lití..... | 26 |
| 1.4.9 Odlévání | 27 |
| 2 Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken | 29 |
| 2.1 Prvek uhlík | 29 |
| 2.1.1 Formy uhlíku..... | 29 |
| 2.2 Získávání uhlíkových materiálů..... | 32 |
| 2.2.1 Pyrolýza, karbonizace, koksování | 33 |
| 2.2.2 Mezofáze | 34 |
| 2.2.3 Grafitizace | 34 |
| 2.2.4 Grafitovatelné a negrafitovatelné materiály | 34 |
| 2.3 Progresivní uhlíkové materiály | 35 |
| 2.3.1 Ohebný grafit..... | 35 |
| 2.3.2 Pyrolytický uhlík..... | 35 |
| 2.3.3 Skelný uhlík | 36 |
| 2.3.4 Uhlíkové aerogely..... | 36 |
| 2.3.5 Uhlíkové nanopěny..... | 37 |
| 2.3.6 Uhlíkové nanotrubičky a nanorohy | 37 |

| | |
|--|----|
| 2.4 Uhlíková vlákna..... | 38 |
| 2.4.1 Uhlíkové vlákno | 38 |
| 2.4.2 Izotopní vlákna | 38 |
| 2.4.3 Vlákna s vysokými parametry | 39 |
| 2.5 Kompozitní materiály..... | 44 |
| 2.5.1 Kompozit vlákno-pryskyřice | 44 |
| 2.5.2 Kompozit s matricí kov, sklo a keramika..... | 46 |
| 2.5.3 Kompozit uhlí-uhlík | 46 |
| 3 Použití kompozitních materiálů na bázi uhlíkových vláken v letectví..... | 51 |
| 3.1 Použití kompozitových dílů u dopravních letadel | 51 |
| 3.2 Použití kompozitových dílů v leteckém průmyslu ČR | 54 |
| ZÁVĚR..... | 55 |
| SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 57 |
| Seznam použitých symbolů a zkratk | 61 |

ÚVOD

Rozvoj kompozitních materiálů je velmi progresivní v celosvětovém měřítku. Materiály z kompozitů nacházejí uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích.

Vláknové kompozity doprovázely člověka už v dávných dobách, například ve formě cihel vyrobených z jílu, který představoval matrici a slámy, která plnila funkci vláken. Výsledné cihly byly díky tomuto složení méně křehké. Od 20. století se kompozitním materiálům začala věnovat větší pozornost především v oblasti vojenského leteckého a kosmického průmyslu a postupně začali kompozity pronikat i do civilních oblastí.

Podstatou kompozitních materiálů („Fiber Reinforced Composites“) je kombinace různých materiálů, díky čemuž vznikne nový materiál se zcela specifickými vlastnostmi.

Hlavním cílem práce bylo vypracování rešerše na dané téma, které bylo kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken.

1 ÚVOD DO KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Myšlenka vzájemného kombinování různých druhů materiálů do jednoho výsledného celku je již velmi stará. Mnohé se v tomto ohledu můžeme naučit od přírody, která ve svých funkčních strukturách, využívá kompozitního principu velmi hojně. Typickými příklady mohou být například struktury dřeva nebo včelí plástve.

1.1 Charakteristika kompozitních materiálů

Kompozitní materiály se velmi často využívají v současné moderní výrobní technologii a to především díky možnosti navrhovat velmi lehké konstrukce s vysokými hodnotami mechanických vlastností. Jsou to především parametry měrné pevnosti, modulu pružnosti a odolnosti proti únavě, které jsou na stejné úrovni jako u slitin hliníku nebo titanu.

Kompozity jsou tvořeny kombinací dvou a více chemicky a fyzikálně odlišných složek do jednoho výsledného celku. Spojením těchto složek vznikne nový materiál s unikátními vlastnostmi. Těchto vlastností nelze dosáhnout kteroukoli složkou samostatně, ani prostou sumací. Tvrdší a pevnější nespojitou složku nazýváme výztuž, spojitou a obvykle poddajnější složku, která zastává funkci pojiva výztuže, nazýváme matrice. [1]

Kompozitní materiály musí splňovat následující podmínky:

- Kompozitní materiál musí být připraven smícháním složek,
- výztuž musí být v kompozitu zastoupena více než 5%,
- fyzikální, mechanické i chemické vlastnosti výztuže a matrice se musí lišit; výztuž je obvykle tužší a významně pevnější v tahu než matrice.

S kompozitními materiály se můžeme setkat v podobě běžných věcí jako například lyže, tenisové rakety či části lodí, tak i v méně běžných, jako komponenty v leteckých konstrukcích nebo v zařízeních vysílaných do kosmického prostoru.

Mezi hlavní výhody kompozitních materiálů patří:

- Odolnost proti korozi,
- nízká teplotní dilatace,
- pozvolný postup poruchy,
- vysoká odolnost proti vibracím,
- dobrá rázová pevnost,
- výrazně zvyšují životnost konstrukce,
- nižší nároky na údržbu,
- nízká měrná hmotnost (4x lehčí než ocel),
- zanedbatelné ztráty elektromagnetického záření (kryty telekomunikačních a radarových antén). [2]

Kompozitní materiály mají také oproti klasickým kovovým konstrukcím velkou výhodu, která spočívá ve výrobním procesu. Umožňují velké úspory díky menšímu množství vyráběných dílů, menšímu množství odpadu a jednodušší výrobě složitých tvarových dílů. Kladením vrstev lze u kompozitu plynule měnit tloušťku a u složitých tvarů povrchů se zjednodušuje výroba. Tato vlastnost je také jedním z hlavních argumentů pro jejich použití.

Za nevýhodu lze u kompozitu považovat vysokou citlivost na technologickou kázeň při výrobě. Musí být dodržen přesný poměr matrice a výztuže, orientace vláken a následný postup při vytvrzování. Jejich vlastnosti velmi ovlivňuje teplota, vlhkost a jiné parametry okolního prostředí při výrobě.

Kompozity je možné členit podle různých hledisek. Podle druhu matrice se rozlišují kompozity s kovovou, polymerní nebo keramickou matricí. Podle druhu zpevňující fáze to mohou být kompozity s kovovou, uhlíkovou, skleněnou, přírodní, polymerní a keramickou fází. Podle tvaru zpevňující fáze jsou to kompozity s částicovými nebo s vláknovými zpevňujícími fázemi.

Je nutná optimalizace složení kompozitu z hlediska použité matrice a výztuže i z hlediska plánovaného použití materiálu. Při překročení určité hranice množství výztuže v kompozitu, dochází ke ztrátě mechanických vlastností kompozitu. [3, 4, 5, 6]

1.2 Matrice kompozitních materiálů

Matrice v kompozitu zajišťuje spojení výztuže v kompaktní celek, udržuje výztuž ve správné orientaci a přenáší na ni a mezi ni rovnoměrně zatížení. Matrice také chrání výztuž před vnějším prostředím, odděluje vzájemně jednotlivé částice výztuže od sebe a zabraňuje tak spojitému šíření trhliny a poškození. Funkci pojiva by si matrice měla udržet i po prvních poruchách výztuže a musí být dostatečně pružná, aby nedošlo při tahovém namáhání k jejímu porušení dříve než k poruše vláken. Tento požadavek splňují pouze polymerní a kovové matrice. Kompozit poskytuje také mezilaminární smykovou pevnost. Matrice určuje i vlastnosti kompozitu, jako je například smršťivost při vytvrzování, chemická odolnost.

Matrice mohou být:

Polymerní matrice

Polymerní matrice jsou používány pro svou dobrou korozivzdornost, dobré dielektrické vlastnosti a elektrickou nevodivost při použití se skleněnými, křemennými a polymerními vlákny. Mají také dobrou propustnost pro rentgenové záření při použití s uhlíkovými vlákny. Polymerní matrice se dělí na reaktoplasty a termoplasty. Kvůli snaze o recyklovatelnost materiálu kompozitních dílů vyráběných ve velkých sériích vede k nahrazování reaktoplastů termoplasty.

Kovová matrice

Kovová matrice má oproti polymerní matrici elektrickou a teplotní vodivost, nehořlavost, smykovou pevnost, tvárnost, odolnost obrusu, možnost povlakování, spojování, tvarování, vyšší tepelnou odolnost, odolnost vlhkému prostředí a povrchovému poškození. Oproti polymerní matrici jsou však podstatně vyšší výrobní náklady. Dnes se kovové matrice nejčastěji dělí na hliníkové slitiny (rozsah teplot 300 až 400°C), titanové slitiny (rozsah teplot 500 až 600°C) a na super slitiny, které jsou na bázi niklu, kobaltu a železa (teplotní rozsah 1000 až 1150°C).

Keramická matrice

Keramická matrice je tvořena ze skla, sklokeramiky nebo keramiky. Má dobrou pevnost v tahu i při teplotách, kterým některé kovové matrice již neodolávají. Má dobrou tepelnou a chemickou odolnost. Je ale velmi křehká, silně vrubově citlivá

a má malé poměrné prodloužení při přetržení. Keramická matrice špatně přenáší zatížení do vláken. Maximální objemový podíl vláken je 50 %, při větším obsahu vláken se matrice stává pórovitou.

Uhlíková matrice

Uhlíková matrice se používá v kombinaci s uhlíkovými výztužemi. Je podobně křehká jako keramická matrice. Slouží hlavně pro součástky, které jsou namáhány extrémními teplotami, například u tepelné izolace raketoplánu, disky a třecí elementy brzd letadel. Modul pružnosti E grafitové matrice je 15 až 25 GPa. [7, 8, 9]

1.3 Výztuže

Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze různých rozměrů. Nejmenší rozměry mají nanokompozity u kterých se délka nebo průměr vlákna se pohybuje v řádu 100 nm. Dále pak mikrokompozity, které mají největší příčný rozměr výztuže v rozmezí 100 až 102 μm . Mikrokompozity mají v průmyslu největší význam. Největší rozměry vyztužující fáze mají makrokompozitů. U těch se velikost příčného rozměru pohybuje okolo 100 mm a jsou používány především ve stavebnictví (železobeton).

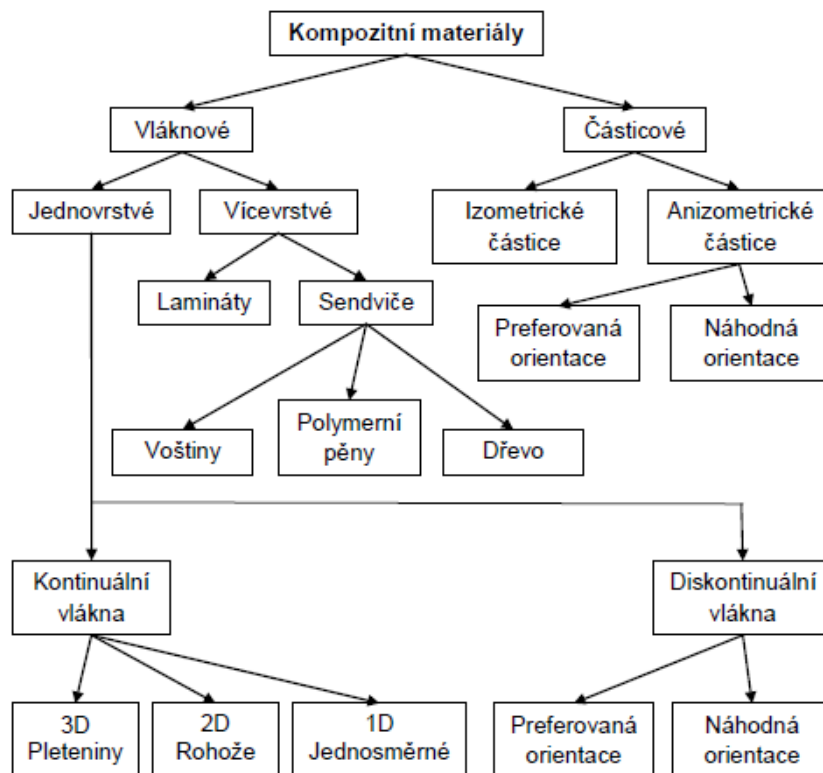
Výztuž je taková složka kompozitu, kvůli níž se kompozit vytvořil. Má některou výhodnou vlastnost, kterou chceme uplatnit a využít, ale není to možné v elementární podobě výztuže přímo, protože jiné její vlastnosti to přímo neumožňují.

Výztuže se dají dělit podle tvaru (viz. obr. 1) a velikosti a podle použitého materiálu (viz. obr. 2).

Při rozdělení podle tvaru a velikosti se využívá štíhlostního poměru, který definujeme jako podíl největšího a nejmenšího rozměru výztuže.



Obr. 1 Dělení kompozitních materiálů podle tvaru a uspořádání výztuže [5].



Obr. 2 Rozdělení dle geometrie výztuže.

Nejnižšího vyztužení kompozitu je dosaženo výztuží ve tvaru kulové částice. Vyztužení dále roste přes destičkové částice výztuže až po nejvyšší hodnoty u vláknových výztuží. Z této závislosti vyplývá, že zpevnění roste se zvyšující se anizotropií částic.

1.3.1 Částicové výztuže

Částice jsou buď minerálního původu, kdy se zpracovávají průmyslově mechanickým mletím na určitý tvar a velikost nebo jsou vyráběna průmyslově při chemické změně z přírodních zdrojů. Na druhu výrobního procesu závisí tvar a velikost částice.

Částicové výztuže se dále dělí na izometrické, které mají tvar koule nebo elipsoidu a anizometrické, které mají tvar destiček nebo jehlic. Částicové výztuže mají vlastnosti nezávislé na směru.

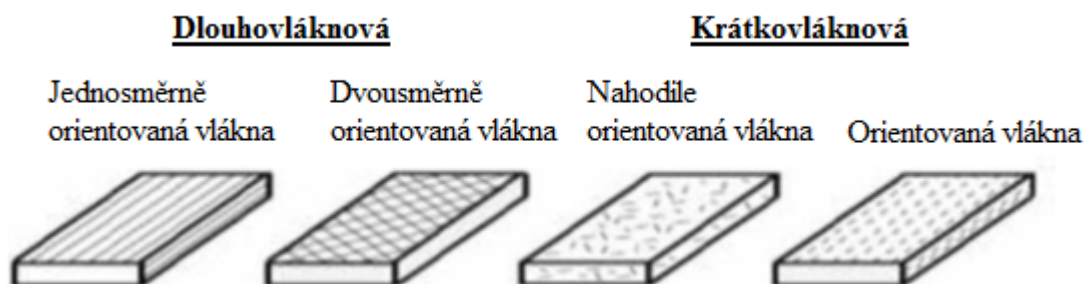
Zvýšení tuhosti a zlepšení tvarové stálosti se dosahuje použitím anorganických částic. Elastomerní částice v kompozitu zlepšují jeho houževnatost. Částice sulfidu a grafitu zvyšují odolnost proti otěru a zlepšují kluzné vlastnosti.

1.3.2 Vlákňové výztuže

Jeden rozměr vláknové výztuže je výrazně větší, než dva zbývající. Vlákna výztuže rozhodují o tahové, tvarové a ohybové pevnosti kompozitu. Tyto vlastnosti ovlivňuje materiál vláken, jejich množství obsažené v matrici a jejich orientace. Orientací vláken lze optimalizovat pevnost a tuhost, odolnost proti únavě, teplotě a vlhkosti. Pevnost a tuhost konkrétního materiálu se významně mění podle směru uložení

vláken. Nejvyšší pevnost je ve směru vláken a podstatně horší pevnosti je dosaženo ve směrech mimo orientaci vláken.

Vláknové výztuže mohou být dlouhé, nepřerušené po celé délce výrobku nebo krátké. Vlákna mohou být uspořádána v jednom směru, ve dvou směrech nebo chaoticky (viz. obr. 3).



Obr. 3 Dělení vláknové výztuže [10].

Sdružením elementárních vláken vznikají prameny, které jsou dále zpracovány na následující polotovary:

- Mletá vlákna (prameny mají potřebnou délku),
- sekané prameny (křehká vlákna),
- prameny bez zákrutů,
- jednoduchá a kabelová příze (pro výrobu technických tkanin),
- rovingy,
- tkaniny,
- rohože (vznikají ukládáním nepravidelně orientovaných 50 mm dlouhých vláken),
- prepregy (různě široké a obsahují tkaninu, rohož nebo rovingy v paralelním uspořádání).

Nejpoužívanější jsou rovingy a tkaniny. Rovingy se dodávají na cívkách s vnitřním nebo vnějším odtahem nebo ve formě pásek o určité šířce obsahující vlákna převážně v podélné orientaci (v příčném směru jsou vlákna vázána pouze za účelem dodržení konstantní šířky pásy). Tkaniny mají různou textilní vazbu (viz. obr. 4). Vedle požadavků na tuhost a pevnost kompozitu o vhodné vazbě rozhoduje i tvarová členitost forem. Vzájemné uspořádání osnovy a útku vytváří tři základní typy vazeb:

- Plátňová vazba, která je nejpevnější a také nejméně poddajná při tvarování,
- keprová vazba, která je ohebnější, ovšem pouze při měkké povrchové úpravě vláken (Na tkanině je vytvářen diagonální vzor). Má nejčastější využití (poměr ceny ke tvarovatelnosti),
- atlasová vazba, která je nejméně pevnou textilní vazbou, ale nejlépe tvarovatelnou.



Obr. 4 Typy tkaní [1].

Druh materiálu vláken lze v tkaninách navzájem kombinovat i s jinými druhy vyztužujících vláken (ve směru menšího namáhání lze vlákna nahradit levnějšími skleněnými vlákny). Výsledkem jsou hybridní tkaniny.

Podle použitého materiálu se vláknové výztuže dělí:

Skleněná vlákna

Jsou amorfní a vyrábějí se tažením z taveniny. Tato vlákna mají průměr nejčastěji od 3,5 do 20 μm . Potřebného průměru vláken se dosáhne dloužením proudu skla, vytékajícího z platinových trysek (průměr trysek je 1 – 2 mm). Vytažená vlákna se sdružují do pramene a navíjí se na buben. Před navinutím na buben se musí ještě za horka vlákno opatřit tenkým ochranným povlakem, protože vlákna jsou velmi abrazivní a lámavá. Jako povlak se používají lubrikační vosky nebo vazebné prostředky. Předností skelných vláken je především nízká cena. Skelná vlákna mají lepší houževnatost než uhlíkové vlákna.

Polymerní vlákna

Využívají se především díky své malé hustotě. Vysoké tuhosti a pevnosti vlákna je dosaženo téměř dokonalou orientací tuhých lineárních makromolekul v podélném směru vlákna. Polymerní vlákna nejsou křehká, při kolmém působení tlakové síly na vlákno dojde k plastickému přetvoření.

Vlákna z aromatických polyamidů – aramidů, pod obchodním názvem Kevlar a Nomex, byly vyvinuty společností DuPont. Aramidová vlákna se používají se ve formě rovingu nebo tkanin a to samostatně nebo jako hybridní v kombinaci se skleněnými nebo uhlíkovými vlákny. Oproti skleněným vláknům jsou aramidy výrazně lehčí. Mají rovněž dvojnásobně větší modul a vynikající schopnost absorbovat energii. Kevlar je odolný plamenu, je samozhášivý a netaví se. Velmi dobře tlumí vibrace a má dobrou rázovou houževnatost. Tkanina z aramidových vláken se proto používá na neprůstřelné vesty, ochranné kalhoty dělníků, sportovní pomůcky, náhražky azbestu a jako pletenina pro ochranné rukavice.

Bórová vlákna

Tato vlákna mají oproti ostatním vláknům velký průměr (102 μm) a mají větší tvarovou stabilitu při tlakovém namáhání. Jejich pevnost v tlaku je větší než pevnost

v tahu. Kompozit s bórovými vlákny je dražší než s vlákny uhlíku, ale má lepší mechanické vlastnosti. Hlavní oblastí aplikace je zpevnění konců tlakem namáhaných prvků, výroba dílů s velmi malou tepelnou roztažností.

Keramická vlákna

Jejich hlavní předností je jejich výborná tepelná a velmi dobrá chemická odolnost. Kontinuální vlákna karbidu křemíku (SiC) jsou relativně levná, protože výchozí suroviny jsou dostupné ve větším množství. Jsou zatím používána pouze s uhlíkovými, kovovými nebo keramickými matricemi pro letecký průmysl a pro výrobky pracující za vysokých teplot. Kontinuální vlákna oxidu hlinitého (Al_2O_3) nacházejí podobné využití jako vlákna karbidu křemíku. Od SiC vláken se však liší svojí elektrickou nevodivostí, což jim umožňuje využití například v kompozitech pro kryty radarů. Vlákna SiC a Al_2O_3 mají větší tuhost než skleněná a polymerní vlákna.

Přírodní vlákna

Jsou to vlákna z obnovitelných zdrojů, zejména na bázi celulózy – sisal, len, konopí, bavlna, juta nalézají uplatnění jako levnější alternativa skleněných vláken. V poslední době jsou stále více využívána při výrobě pevnostně méně náročných a zároveň lehkých dílců v interiérech automobilů a jiných dopravních prostředků. Při používání rostlinných vláken dochází k úspoře polymeru, odpad je možné recyklovat, mají přírodní vzhled povrchu a je možný rychlejší výrobní postup díky větší tepelné vodivosti. Používají se ve formě pramenců a nití, netkaných materiálů – rohoží nebo tkanin.

Kovová vlákna

Vyrábějí se z ušlechtilých materiálů, jako jsou korozi-vzdorné a žáruvzdorné oceli a slitiny na bázi niklu. Použití nacházejí ve formě vodivých tkanin, jako filtrační média pro agresivní látky a vysoké teploty, tepelné štíty a k plnění elektricky vodivých plastů a kompozitů.

Čedičová vlákna

Vlastnostmi se čedičová vlákna výrazně podobají skleněným vláknům typu S. Výroba těchto vláken se více rozšířila teprve nedávno, jedná se o nový typ technického vlákna. Tato vlákna mají vysokou pevnost, nízkou tažnost. Vlákna jsou nehořlavá, nenasákavá, mají nízkou tepelnou vodivost, vysoký elektrický odpor, dobrou tepelnou odolnost. Výhodou je také jejich cena, která činí asi 60 % ceny skleněných S vláken. Jednou z negativních vlastností těchto vláken je jejich křehkost. Technologie používaná na výrobu čedičových vláken je obdobná jako technologie na výrobu vláken skleněných. Čedičová vlákna nacházejí uplatnění ve stavebnictví v podobě tepelně a zvukově izolačních desek, příček, stropů, sendvičového obvodového zdiva, podlah a v různých technických výrobcích jako rozbrušovací kotouče, lamináty, brzdové destičky.

Uhlíková vlákna

Jsou krystalická, mají vysokou pevnost, modul pružnosti, tepelnou odolnost a vysokou únavovou pevnost současně s nízkou měrnou hmotností. Jsou elektricky vodivá. Nevýhodou je nízká odolnost proti nárazu, způsobená křehkostí uhlíkového vlákna a elektrochemická koroze při kontaktu s méně ušlechtilými kovy. Díky jejich vysokému modulu a pevnosti, poměrně nízké váze a také ale vysoké ceně

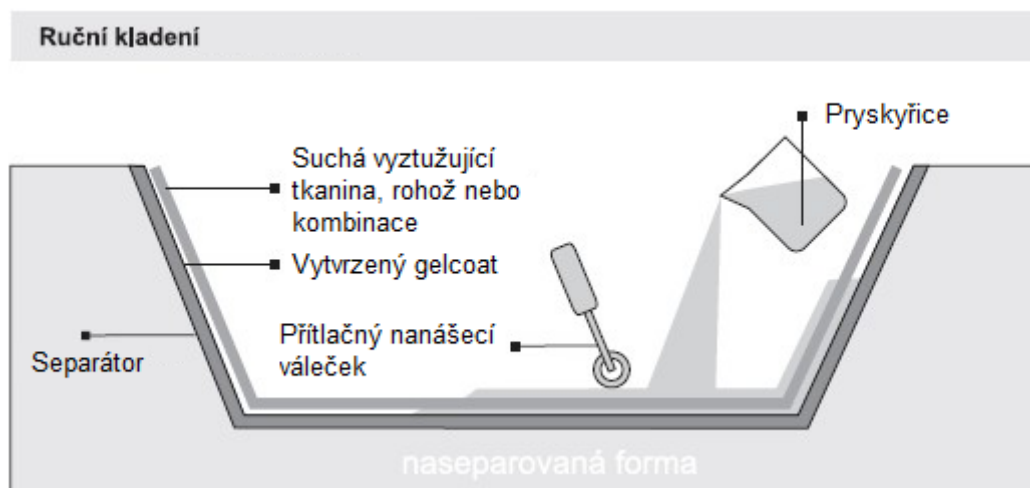
se uhlíková vlákna používají na špičkové aplikace pro lodě, sportovní potřeby, automobily, v letectví jako primární konstrukce a v kosmických aplikacích. V současné době se začínají používat hybridní tkaniny, vyrobené z více druhů vláken, například uhlík-kevlar. Používají se pro kombinaci vlastností obou druhů vláken. Podrobněji se budeme zabývat uhlíkovými vlákny v dalších kapitolách. [11, 12, 13]

1.4 Technologie výroby kompozitových dílů

Technologií na výrobu kompozitů je velmi mnoho. Základní rozdělení výroby kompozitů je možné podle formy a to na otevřenou nebo uzavřenou formu.

1.4.1 Ruční kladení

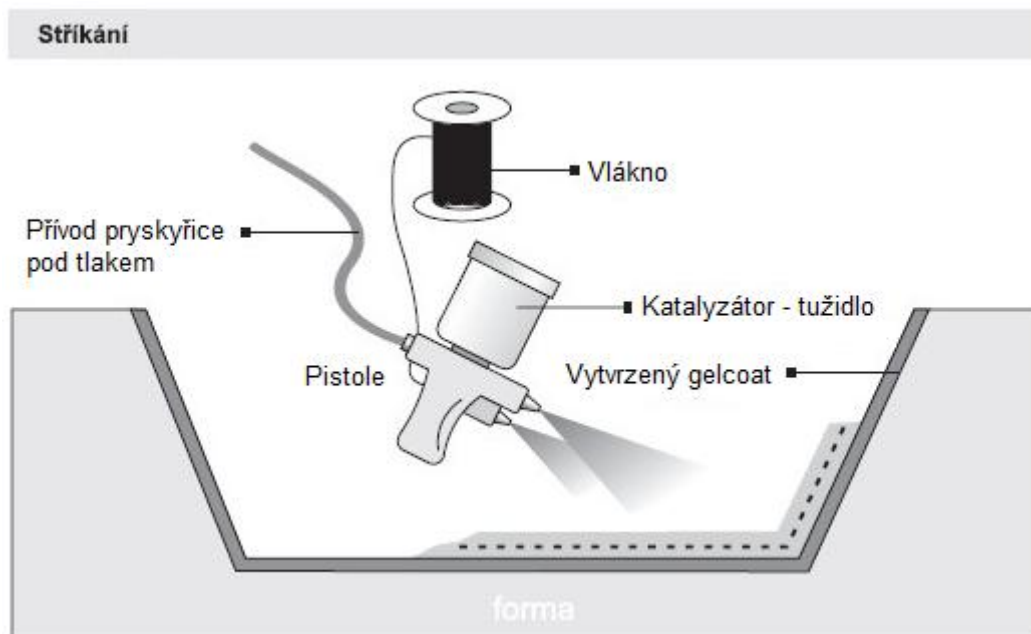
Ruční kladení (viz. obr. 5) patří mezi nejstarší, nejrozšířenější a nejjednodušší výrobní technologii. Otevřená forma se nejdříve opatří povrchovou vrstvou (gelcoat), která se nanáší ručně nebo stříkáním a slouží k ochraně povrchu dílce před okolním prostředím. Po částečném vytvrzení této povrchové vrstvy se postupně kladou do formy jednotlivé vrstvy výztuže a pomocí štětce nebo válečku se ručně prosycují iniciovanou pryskyřicí. Technologie je vhodná pro malé až velkorozměrové díly od tvarově jednoduchých až po značně složité. Vzhledem k malé náročnosti a nízkým nákladům slouží také pro výrobu prototypů.



Obr. 5 Schéma ručního kladení [14].

1.4.2 Stříkání

Při této metodě se pneumatically nanáší na otevřenou formu, nejčastěji ručně, pomocí speciální pistole současně sekaný roving a iniciovaná pryskyřice. Technologie stříkání je vhodná pro výrobu středních až velkorozměrových tvarově jednoduchých dílců. Stříkání (viz. obr. 6) je vhodná metoda pro sériovou výrobu a to převážně díky možnosti efektivního, rychlého nanášení velkého množství materiálu. Nevýhodou této technologie výroby je zvýšené množství odpadu a poměrně vysoké vstupní investice na stříkací zařízení.

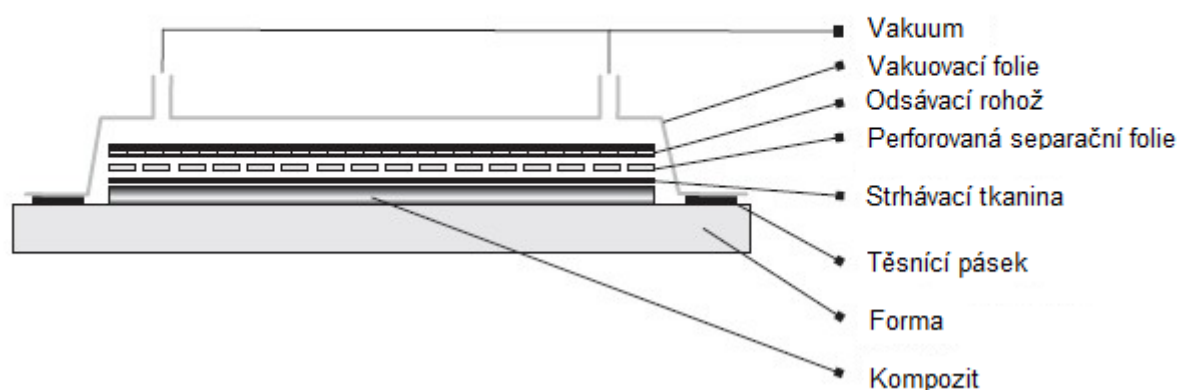


Obr. 6 Schéma stříkání [6].

1.4.3 Lisování

Technologie lisování (viz. obr. 7) se dělí na lisování za studena, pomocí vakua, v autoklávu a za použití tepla a tlaku. Lisování za studena je vhodné pro investičně nenáročnou výrobu a provádí se za nízkého tlaku a normální teploty v nevyhříváných dvoudílných formách, díky kterým má výlisek oboustranně hladký povrch. Lisování za pomoci vakua se využívá pro odstranění přebytečné pryskyřice z důvodu zvýšení mechanických vlastností. Vyráběné díly jsou oboustranně hladké s vysokým obsahem výztuže s dobrými mechanickými vlastnostmi. Technologie je finančně nenáročná, vyjma investice do vakuové pumpy. Technologie lisování v autoklávu patří mezi nejsložitější a zároveň nejnákladnější technologii výroby velkorozměrových konstrukcí pro kosmický, letecký a automobilový průmysl vyžadujících vytvrzování za zvýšené teploty. U lisování za tepla a tlaku se používá dvou nebo vícedílných kovových vyhříváných forem s leštěnými pracovními plochami, které jsou upevněny v hydraulických lisech. Tato technologie patří mezi nejproduktivnější metodu velkosériové výroby malých a středně velkých dílů. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady na lisy a formy.

Lisování pomocí vakua

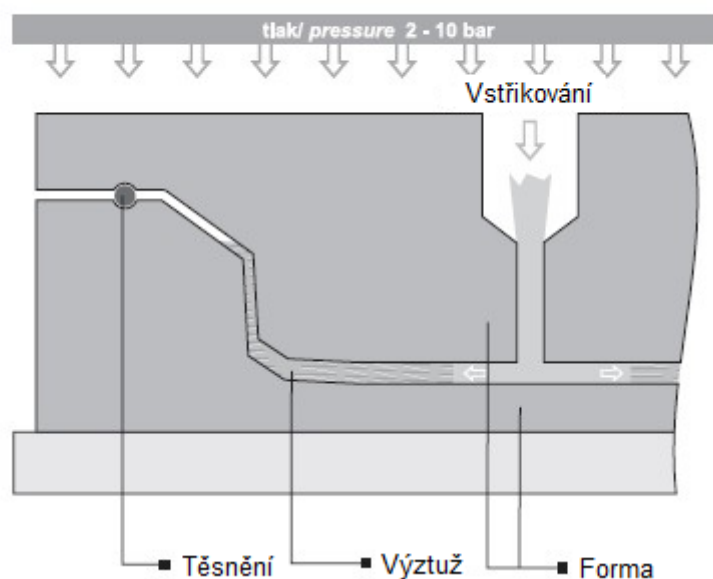


Obr. 7 Schéma lisování [6].

1.4.4 Vysokotlaké vstřikování

Pro tuto technologii jsou typické robustní kovové nebo polymerbetonové formy z důvodu vysokých vnitřních tlaků využívaných pro tuto metodu. Po vložení výztuže tvořené nejčastěji skleněnými vlákny se forma uzavře a vstřikovacím otvorem je pomocí injektážní pistole přivedeno pojivo z vysokotlaké pumpy. Pojivo je do formy vstřikováno, dokud nedojde k úplnému prosycení výztuže, což je signalizováno vytékáním pojiva z kontrolních otvorů. Vysokotlaké vstřikování (viz obr. 8) je vhodné pro sériovou výrobu díky krátkým výrobním cyklům. Mezi nevýhody patří vysoké pořizovací náklady na vstřikovací zařízení.

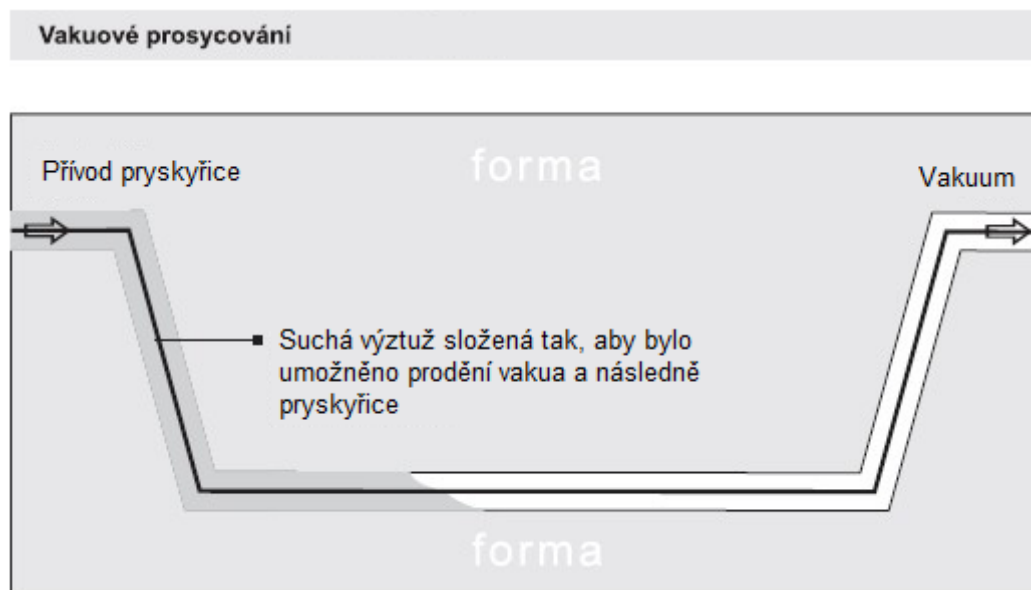
Vysokotlaké RTM



Obr. 8 Schéma vysokotlaké RTM [6].

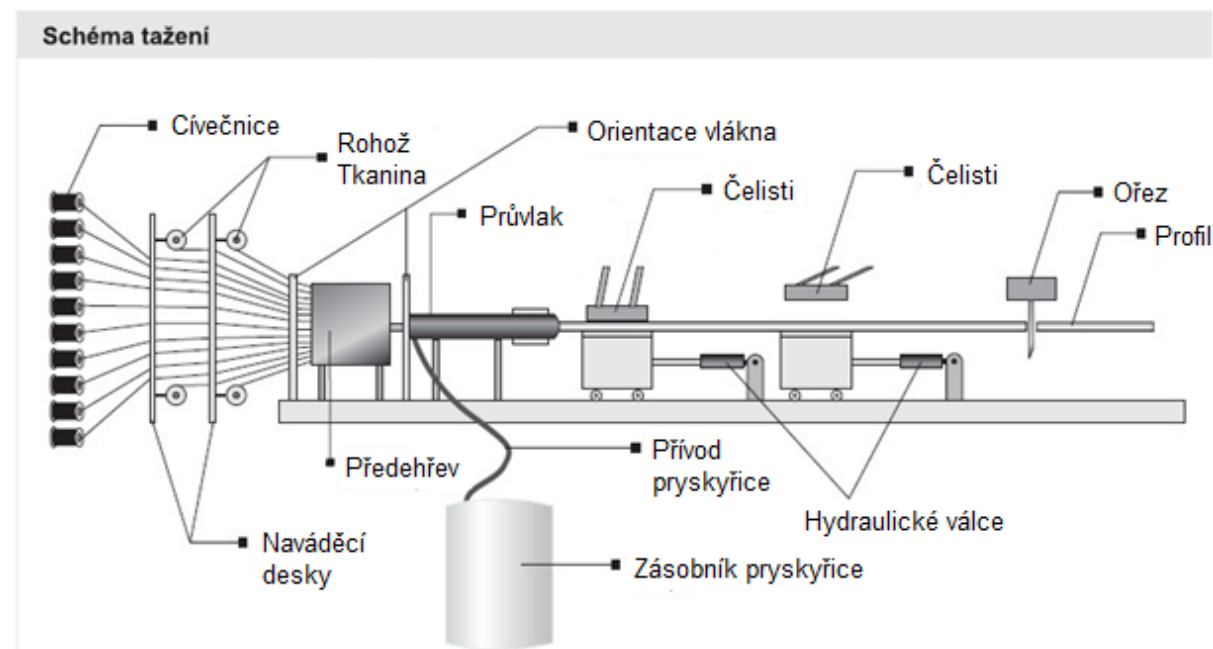
1.4.5 Vakuové prosycování

Při této technologii se využívají dvě hlavní modifikace. Mezi první patří vakuové prosycování (viz. obr. 9) s pružnou vrchní částí formy a tuhou spodní částí. Prosycování je zajištěno vakuem. Metoda se využívá pro oboustranně hladké dílce. Druhou modifikací je vakuové prosycování pod pružnou folií, kdy spodní forma je stejného typu jako u ručního kladení a místo druhé části formy se používá pružná folie, která je k okrajům formy připevněna těsnícími pásky. Vakuum je využíváno po obvodu formy pomocí kanálku, vytvořeného těsnícími profily. Vakuové prosycování je používáno u velkorozměrných dílů, jako jsou kapotáže, lopatky větrných elektráren, trupy a paluby lodí.



1.4.6 Tažení (Pultruze)

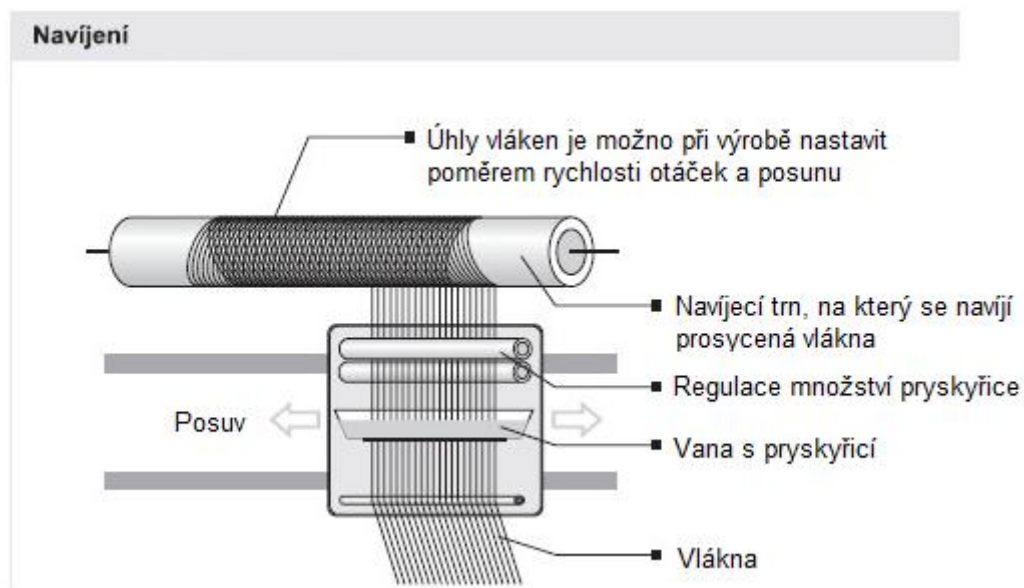
Touto metodou lze vyrábět různé plné, duté i tvarové profily s vysokým obsahem výztuže (až do 80%). Nejčastěji se jako výztuže používá skleněný roving, méně často uhlíkové pramence. Při této metodě jsou vlákna pomalu protažena skrz zahřátou průtažnici, díky které se vytvoří konstantní průřez. Tažení (viz. obr. 10) je levnější než ruční kladení a nevyžaduje velké počáteční investice. Není ale použitelné pro složitější geometrii.



Obr. 10 Schéma tažení[6].

1.4.7 Navíjení

Při této výrobní technologii se navíjí výztuž, tvořená obvykle skleněnými, uhlíkovými nebo aramidovými pramenci impregnovaných pojivem na jádro ve tvaru výsledného výrobku. Tímto způsobem se vyrábějí trubky, kolena, nádrže, nádoby a jiná dutá tělesa. Výrobky mají vynikající fyzikální vlastnosti a kvalitní povrch. Mezi nevýhody navíjení (viz. obr. 11) patří vysoká cena používaných navíjecích zařízení a také obtížné odstraňování vnitřních forem.

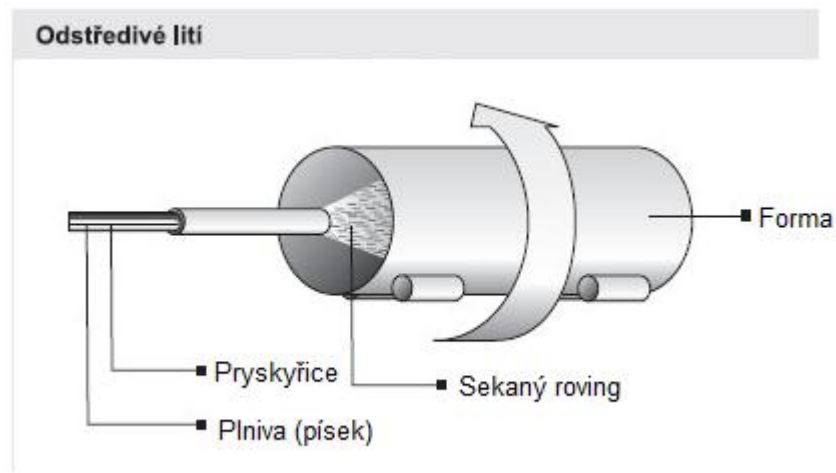


Obr. 11 Schéma navíjení [6].

1.4.8 Odstředivé lití

Odstředivé lití (viz. obr. 12) se využívá pro výrobu dutých těles rotačního tvaru, zejména silnostěnného potrubí vhodného pro zásyp. V rotující duté formě se na ose

pohybuje stříkací zařízení, které nanáší směs sekaných vláken, iniciované pryskyřice a další plniv.



Obr. 12 Schéma odstředivého lití [6].

1.4.9 Odlévání

Technologie odlévání (lití) se používá pro výrobu vlákný nevyztužených kompozitů. Podstatou procesu je lití směsi pryskyřic, plniv, pigmentů, aditiv a vytvrzovacích složek do forem za určitých podmínek, závislých na konečném produktu. [14, 15]

2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY NA BÁZI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

Jako první uplatnění našel uhlík v 16. století jako tuha do tužek. V polovině minulého století se začaly uhlíkové materiály více využívat a rozvíjet. Využití našly v oblasti elektrické energie a v elektrometalurgii. Větší pozornosti se uhlík zasloužil počátkem padesátých let a to díky jaderné energii vyráběné v grafitových reaktorech chlazených plynem. Díky tomuto využití vzbudil uhlík zájem vědeckého světa a odstartoval řadu výzkumů a studií, které vedly k přizpůsobení uhlíkových materiálů novým požadavkům. V šedesátých letech začal uhlík pronikat do oblasti letectví a kosmonautiky. Během posledních 25 let se rozvinulo několik nových uhlíkových materiálů jako kompozit uhlík-uhlík, uhlíková vlákna na bázi PAN (polyakrilonitrilu) a mezofázových smol, pružný grafit, nanotrubičky, nanopěny a skelný grafit. Uhlíkové materiály se stali velmi moderním materiálem, používaným jak v tradičním průmyslu, tak i ve špičkových odvětvích a jejich význam stále roste.

Uhlík je velmi jedinečný materiál. Odolává vysokým teplotám nad 2000°C bez zhoršení svých mechanických vlastností. Do teplot nad 2500 stupňů dochází v případě uhlíku dokonce ke zlepšování mechanických vlastností. Uhlík může být vodičem stejně jako kovy nebo izolátorem jako keramika. Může mít mazací vlastnosti nebo být mechanicky velmi odolný. Slouží pro výrobu kompozitních materiálů a může být využíván ve formě tkanin. Jeho vlastnosti lze modifikovat a díky tomu přizpůsobovat materiál našim požadavkům pro použití v daném oboru.

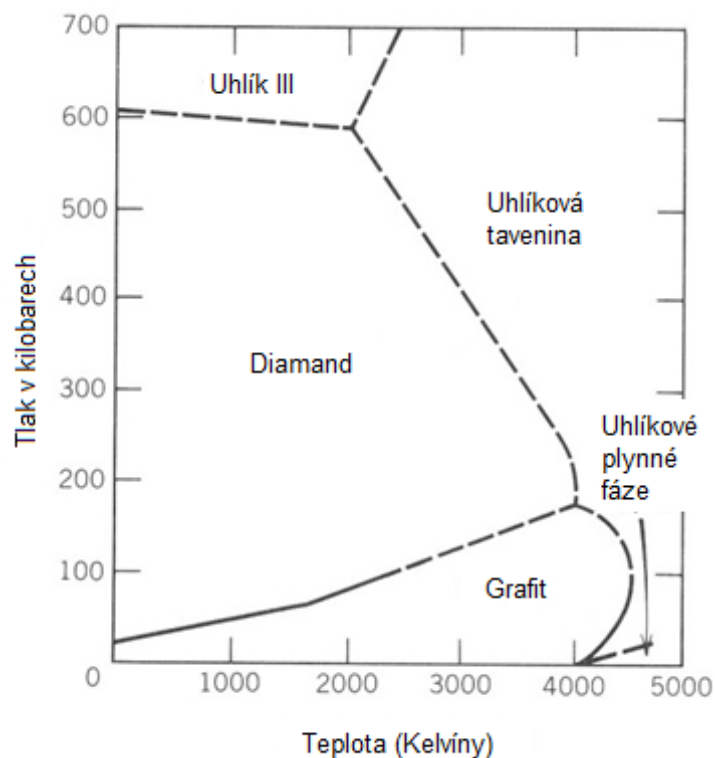
2.1 Prvek uhlík

Uhlík (latinsky Carboneum) je základem všech organických sloučenin. Tento chemický prvek je na zemi zastoupen v relativně malém množství. Přesto je mnohem významnější než ostatní prvky, díky schopnosti tvořit velké množství molekul. V současnosti bylo popsáno více než 20 milionů organických sloučenin. Uhlík se v přírodě vyskytuje ve formě sloučenin obsažených v horninách, ve vzduchu nebo jako grafit a diamant v ryzím stavu. Sloučeniny uhlíku tvoří také základ světové energetiky jako zemní plyn, ropa a uhlí. S výrobky z chemického průmyslu na bázi uhlíku se setkáváme ve formě plastů, umělých vláken, léčiv a mnoho dalších.

2.1.1 Formy uhlíku

Uhlí patří mezi nekovové prvky a v přírodě se v elementárním stavu jako minerál vyskytuje ve dvou základních modifikacích a to jako grafit a diamant. V posledních letech byly v přírodě objeveny nebo laboratorně vytvořeny další modifikace jako například chaoit, grafyn a fullereny.

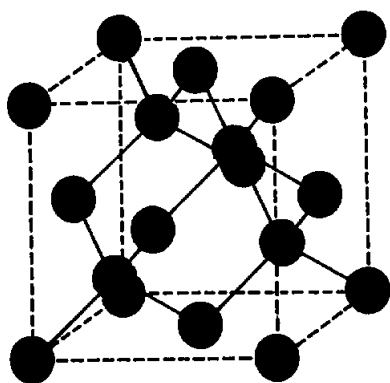
V této kapitole se budeme zabývat obecnými vlastnostmi jednotlivých forem uhlíku.



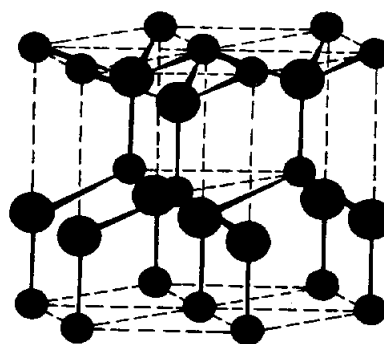
Obr. 13 Fázový diagram uhlíku, vyznačeny jsou pole stability grafitu, diamantu, uhlíkové taveniny a uhlíkové plynné fáze [16].

Diamant

Diamant je čistý přírodní uhlík vykrystalizovaný v horninách ve velkých hloubkách za velmi vysokých tlaků. V diamantu je každý jednotlivý atom uhlíku vázán s ostatními atomy silnou kovalentní vazbou. Nejběžnější struktura diamantu je kubická s opakováním vrstev ABCABC (viz. obr. 14), u které připadá 8 atomů na základní buňku. Velmi zřídka se vyskytuje struktura hexagonální (viz. obr. 15), která byla objevena v meteoritech.



Obr. 14 Kubický diamant [17].



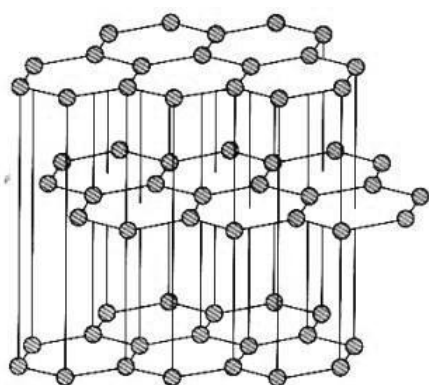
Obr. 15 Hexagonální diamant [17].

Diamant je nejtvrdším materiálem této planety. Dosahuje nejvyššího, 10. stupně tvrdosti na Mohsově stupnici, která měří tvrdost minerálů. Jeho modul pružnosti je také nejvyšší ze všech známých materiálů (1050 GPa). Diamant má měrnou hmotnost $3,51\text{g/cm}^3$ a 6x větší tepelnou vodivost než měď. Těto vlastnosti se využívá

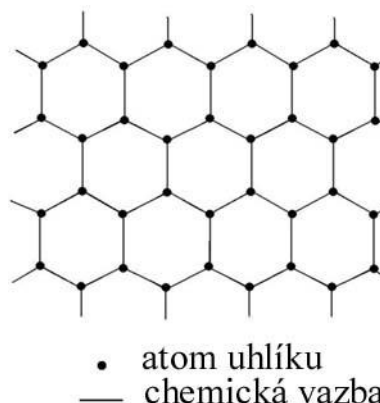
při použití diamantů v nanotechnologiích. Současně má také velmi malou teplotní roztažnost. Diamant je díky své vysoké propustnosti nejlepším známým optickým materiálem. Index lomu dosahuje u diamantů specifické hodnoty 2,417. Při nepřítomnosti světla je diamant izolátor. Jeho vodivost se mění, pokud je vystaven UV záření. Co se chemické stability týče, je diamant inertní materiál, který reaguje pouze v silně oxidačních prostředích za zvýšené teploty. [18]

Grafit

Grafit je šesterečný, nekovový minerál, který je za běžných podmínek stabilní formou uhlíku. Atomy uhlíku jsou v ideálním případě uspořádány v paralelních rovinách a v této rovině atomy vytváří síť s hexagonálním motivem (viz. obr. 16). Strana těchto šestiúhelníků měří 0,142 nm. Atomy jsou v této rovině pospojovány mezi sebou silnou kovalentní vazbou (viz. obr. 17) a atomy umístěné v paralelních rovinách, vzdálených 0,335 nm, jsou vázány mnohem slabší Van der Waalsovou silou. Díky tomu, že je uhlík pevně vázán pouze se třemi nejbližšími atomy ležícími v téže rovině a se čtvrtým atomem, nacházejícím se v paralelní rovině je vázán slabě, dochází ke snadné štěpnosti ve směru, který je k těmto rovinám rovnoběžný (jedna rovina vůči druhé se může snadno posunovat).



Obr. 16 Hexagonální grafit a jeho mřížka [19].



Obr. 17 Grafenová vrstva [19]

Ideální monokrystal grafitu má hustotu $2,269 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Hustota u syntetického grafitu málo kdy překročí hodnotu $2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Obvykle mají hustotu dokonce $1,6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Výjimkou je orientovaný pyrolytický grafit s hustotou až $2,26 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Mechanické vlastnosti závisí na směru působení zatížení. Ve směru kolmém k rovinám grafenových vrstev jsou velmi nízké, naopak ve směru rovnoběžném jsou velmi vysoké. Tvrdost grafitu je na Mohsově stupnici 1,2. Uhlík je nejžáruvzdornější prvek. Zajímavostí je, že do teploty 2500°C dochází k nárůstu pevnostních charakteristik. Tepelná vodivost je jako u mechanických vlastností silně směrově závislá. Ve směru rovnoběžném s grafitickými rovinami je grafit považován za dobrý tepelný vodič, ale ve směru na ně kolmém je naopak považován za izolant. Elektrická vodivost grafitu ve směru grafitických rovin je velice podobná jako u železa. Kolmo na grafitické roviny lze grafit považovat za izolátor. Grafit je chemicky velice odolný a za běžných teplot je inertní. Za vyšších teplot tvoří karbidy (například s prvky Si, Mo, Fe, Ti). [18, 20, 21, 22]

Vlastnosti uhlíku

Tab. 1 Vlastnosti rozmanitých forem uhlíkových materiálů [20]

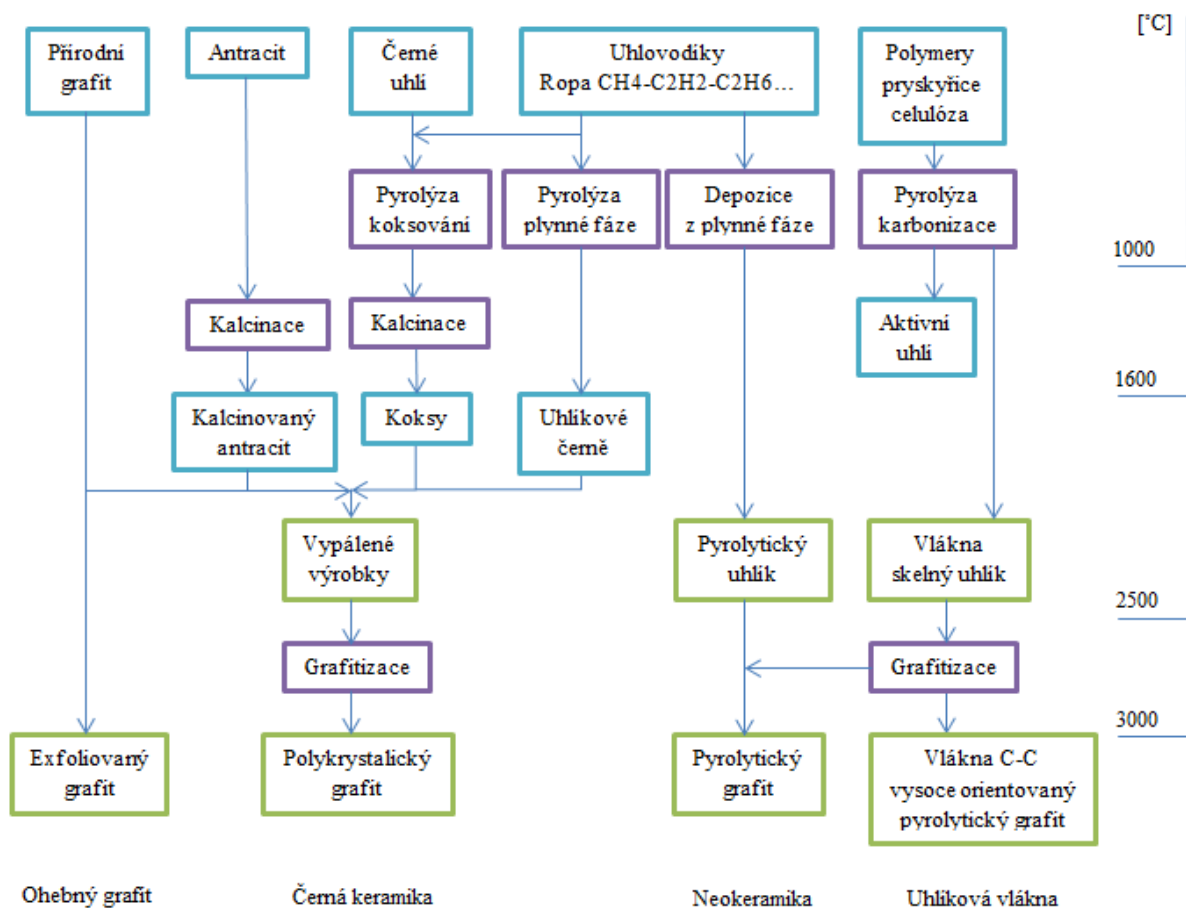
| Vlastnost | Uhlíkový materiál | | | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|--------------------|--------------------------------|
| | Pružný uhlík | Skelný uhlík | Vypálený grafit | Spřádený grafit | Izotropní uhlík | Uhlíková vlákna | Pyrolytický grafit | Vysoce orientovaný pyr. grafit |
| Specifická hmotnost [g·cm ⁻³] | 1,1 | 1,5 | 1,6 | 1,7 | 1,75 | 1,8 | 2 | 2,26 |
| Pevnost v tahu [MPa] | 4 | 100 | 9 | 12 | 25 | 3000 | 190 | |
| Modul pružnosti [GPa] | | 25 | 11 | 10 | 12 | 500 | 350 | 1000 |
| Odpor [mΩ·cm ⁻¹] | 1 50 | 5 | 5 | 0,8 | 1,5 | 0,8 | 0,5 | 0,02 40 |
| Tepelná vodivost [W·cm ⁻¹ ·°C ⁻¹ ·10 ³] | 70 | 4 | 7 | 90 | 70 | 25 | 300 | 950 3,6 |
| Součinitel teplotní roztažnosti při 100 °C [10 ⁻⁶ ·°C ⁻¹] | 0 25 | 3 | 2,5 | 1,5 | 3 | 0 | 0,5 24 | -1 25 |
| Propustnost [cm ² ·s ⁻¹] | 10 ⁻⁵ | 10 ⁻¹¹ | 10 | 10 | 10 ⁻¹ | | 10 ⁻¹² | 10 ⁻⁵ |
| Tvrdoost SHORE | 25 | 100 | 75 | 30 | 50 | | | |

Uvedené hodnoty jsou měřeny ve směru rovnoběžném s preferenční orientací grafenových vrstev s výjimkou tučných hodnot, kde jsou měřeny kolmo ke grafenovým vrstvám.

2.2 Získávání uhlíkových materiálů

Uhlíkové materiály jsou definovány Francouzskou společností pro studium uhlíku (GFEC) jako libovolná pevná forma uhlíku černé barvy, obsahující eventuálně ve stopovém množství další atomy.[20] Podle této definice jsou všechny uhlíkové materiály získávány pyrolýzou organických sloučenin, kromě přírodního grafitu. Při výrobě uhlíkových materiálů představují pyrolýza spolu s grafitizací dvě zásadní stádia, která si detailněji popíšeme v dalších kapitolách.

Následující schéma, znázorněné na obr. 18, popisuje vztahy mezi výchozími surovinami, tepelným zpracováním a výslednými materiály.



Obr. 18 Způsoby získávání uhlíkových materiálů [20].

2.2.1 Pyrolýza, karbonizace, koksování

Pyrolýzou se rozumí termální rozklad organických sloučenin, jako jsou uhlí, ropa, smoly, polymery a uhlovlíky v nepřítomnosti dalších chemických činitelů. [20]

Pyrolýza může probíhat dvěma různými způsoby:

Nízkoteplotní cestou, která spočívá v postupném zvyšování teplot v rozmezí od 200°C do 1000°C (do 1600 °C). Nízkoteplotní proces probíhá při koksování nebo karbonizaci. Dochází-li v kondenzovaném stavu k měknutí materiálu a jeho zkapalnění, jedná se o koksování. Pokud k měknutí a zkapalnění nedojde, jedná se o karbonizaci.

Jevy, ke kterým dochází, jsou velmi složité, protože reakce neprobíhají postupně, ale současně. Dochází zejména k:

- Rozbití vazeb původního materiálu, které vede ke vzniku volných radikálů
- Vzniklé volné radikály mezi sebou reagují, což vede ke vzniku přechodných stabilních struktur
- Aromatizace a polymerace a následně nárůst molekulární hmotnosti
- Eliminace vodíku (Při teplotě 900°C klesá obsah pod 3%)

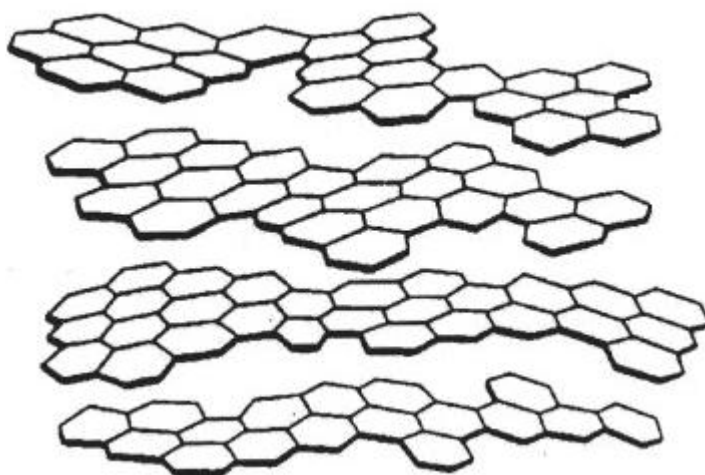
Vysokoteplotní cestou, která probíhá nad 1000 °C a vede ke vzniku rozptýlených agregátů (uhlíkové černě, kompaktní pyrolytický uhlík).

2.2.2 Mezofáze

Kapalný stav dovoluje vyšší mobilitu molekul. Postupnou reakcí volných radikálů vznikají aromatické molekuly, které se shlukují do lamel. Tyto lamely, uspořádané do paralelních vrstev, začnou vytvářet mikrosferule, které představují velmi anizotropní tekuté krystaly. Tyto sferule mohou být zobrazeny v polarizovaném světle a představují oddělenou fázi v izotropním kapalném prostředí, tzv. mezofáze. Sferule mezofáze se postupně začnou růst a spojovat se koalescencí.

2.2.3 Grafitizace

Zahřívání, při kterém dochází k vývoji vlastností uhlíkových materiálů, se nazývá grafitizace. Během pyrolýzy jsou vytvořeny aromatické lamely, které obsahují atomy uspořádané do hexagonálního motivu. Při karbonizaci nebo koksování jsou tyto lamely přeměněny na uhlíkové lamely s hexagonálním motivem (viz. obr. 19) a vedou k vytvoření krystalů. Paralelní roviny mají mezi sebou vzdálenost asi 0,345 nm a uspořádání grafenových vrstev kolem svíslé osy je nedokonalé (turbostratické uspořádání, kde zcela chybí uspořádání v kladu vrstev) a vznikají v rámci rovin různé defekty.



Obr. 19 Hexagonální motiv v turbostratické uspořádání [23].

Během grafitizace dochází k eliminaci defektů, nárůstu krystalů a trojrozměrného uspořádání rovin a snížení vzdálenosti mezi rovinami. Tyto procesy probíhají od 2000 °C do 3000 °C. Struktura krystalů nebude dokonalá. Transformace je závislá na dosažené teplotě a předchozí orientaci krystalů.

2.2.4 Grafitovatelné a negrafitovatelné materiály

Uhlíkaté sloučeniny se dělí na snadno grafitovatelné a negrafitovatelné. Pokud mají krystaly, které se vytvořili během pyrolýzy, tutéž orientaci, jedná se o grafitovatelné uhlíkaté sloučeniny. Velikost těchto krystalů může narůstat, až získají trojrozměrné uspořádání.

Během grafitizační fáze je eliminována většina defektů, průměrný poloměr krystalů vzrůstá (při teplotě 3000°C na desítky až stovky nanometrů) a vzdálenost mezi rovinami klesá na hodnotu 0,335 nm (hodnota dokonalého krystalu). [20, 24, 25]

2.3 Progresivní uhlíkové materiály

V následující kapitole se budeme stručně zabývat vlastnostmi a využitím několika progresivních uhlíkových materiálů. Uhlíkovým vláknům bude věnována samostatná kapitola, kde bude detailně vysvětlena jejich výroba, struktura a použití.

2.3.1 Ohebný grafit

Při stlačení jemných vloček exfoliovaného grafitu lze získat ohebný list grafitu. Ty jsou dále svinovány do rolí a pásek (viz. obr. 20). Má chemickou odolnost, dobré mazací vlastnosti, je žáruvzdorný (odolává i nízkým teplotám), nepropustný, tepelně a elektricky vodivý a snadno tvarovatelný. Používá se proto jako těsnění v korozivním prostředí, v rotujících systémech, v potravinářském průmyslu, jako spojka přírub pro těsnění válců motoru, v konstrukci pecí, při ochraně forem a pro výrobu vodičů fungujících za vysokých teplot.



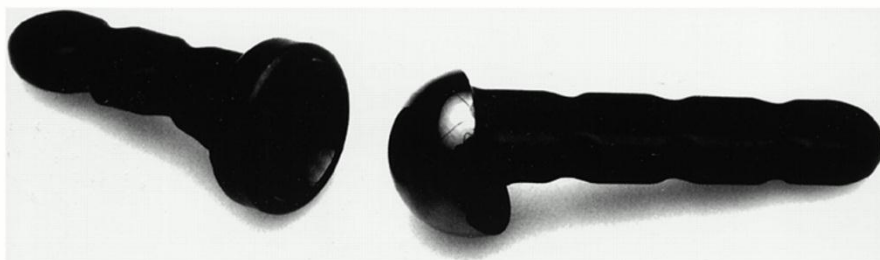
Obr. 20 Ohebný grafit [26].

2.3.2 Pyrolytický uhlík

Pyrolytický uhlík se získává pomocí rozkladu těkavých uhlovodíkových sloučenin při kontaktu s podložkou zahřátou na teplotu 727 - 1827°C. Při použití teplot vyšších než 2000°C, dochází ke vzniku pyrolytického grafitu, který má vysoký stupeň uspořádání.

Vlastnosti pyrolytického uhlíku jsou velmi ovlivňovány výrobním procesem. Specifická hmotnost se pohybuje v rozmezí 1,4 - 2,1 g·cm⁻³. Pyrolytický uhlík i grafit je anizotropní a proto elektrická a tepelná vodivost závisí na stupni orientace vrstev (vyšší je ve směru grafitových vrstev). Mezi další vlastnosti patří nepropustnost, která je srovnatelná s propustností skel.

Pyrolytický uhlík a grafit nachází uplatnění v oblasti povlaků pro jaderná paliva užívaná ve vysokoteplotních jaderných reaktorech a povlečené díly se díky termomechanickým vlastnostem a odolnosti vůči abrazi používají při výrobě trysek raket a tepelných štítů pro návrat do atmosféry v aeronautice. Své uplatnění nalézají i jako biomateriál (viz. obr. 21).



Obr. 21 Implantáty [27].

2.3.3 Skelný uhlík

Skelný uhlík je hladký lesklý materiál s lasturnatým lomem, který se velmi podobá sklu. Skelný uhlík není grafitovatelný a vyrábí se karbonizací regenerované celulózy nebo teplotně tvrditelné pryskyřice za teplot 800 – 1200 °C. Je velmi tvrdý a jeho opracování je složité. Tvar výrobku je proto vytvořen ještě před samotnou karbonizací.

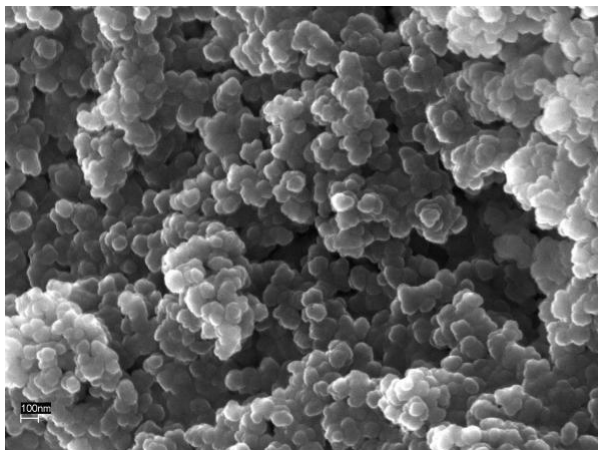
Skelný uhlík je odolný vůči agresivním chemikáliím, nepropustný pro kapaliny a plyny a navíc je lehký. Proto nachází uplatnění v podobě kelímků v analytických laboratořích a pro pěstování monokrystalů, jako leštěná zrcadlová plocha pro harddisky, optické čočky a reflektory výkonných lamp a díky biokompatibilitě i jako elektrody srdečních stimulátorů a náhrada srdečních chlopní.

Tab. 2 Porovnání vlastností pružného, pyrolytického a skelného grafitu

| Vlastnosti | Pružný grafit | | Pyrolytický grafit | | Skelný uhlík |
|---|---------------|-------|--------------------|--------|--------------|
| | | ⊥ | | ⊥ | |
| Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$] | 0,9 – 1,1 | | 1,7 – 2,2 | | 1,4 – 1,5 |
| Pevnost v tlaku [MPa] | | 125 | 105 | 420 | 300 – 420 |
| Pevnost v tahu [MPa] | 5 | 0,001 | 100 | 7 – 10 | 40 – 50 |
| E-modul [GPa] | | | 25 | | 26 – 30 |
| Pevnost v ohybu [MPa] | | | 150 | 100 | 90 – 250 |
| Součinitel délkové teplotní roztažnosti [10^6K^{-1}] | 3 | 100 | 0,9 | 25 | 2 – 3,5 |
| Tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] | 190 | 7 | 400 | 0,9 | 4 – 5 |
| Měrný elektrický odpor [$10^6\Omega\text{m}$] | 10 | 650 | 5 | 6000 | 10 – 50 |

2.3.4 Uhlíkové aerogely

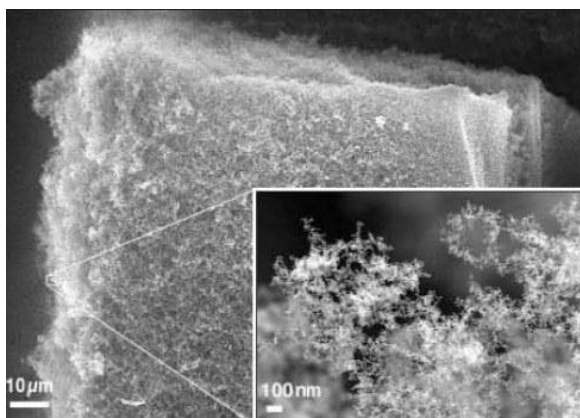
Uhlíkové aerogely (viz. obr. 22) se získávají pomocí karbonizace aerogelů, které se získávají z resorcinformaldehydových pryskyřic. Mají velmi nízkou teplotní vodivost ($0,08 – 0,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) a měrnou hmotnost ($0,25 – 1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), vysoký měrný povrch ($400 – 1200 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$) a zajímavé elektrické vlastnosti. Používají se při výrobě dobíjecích akumulátorů a palivový článků, nosičů katalyzátorů a při výrobě tepelných izolací.



Obr. 22 Uhlíkový aerogel [28].

2.3.5 Uhlíkové nanopěny

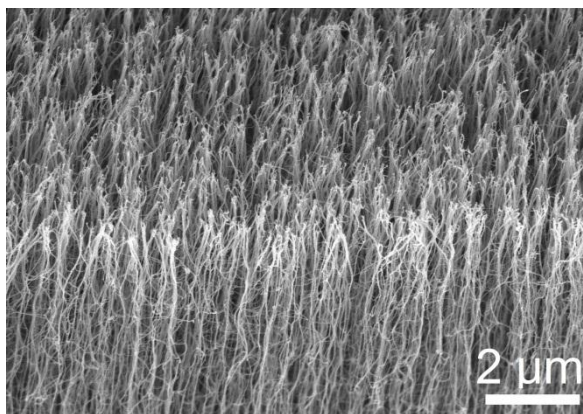
Uhlíková nanopěna (viz. obr. 23) patří mezi nejnovější objevy v oblasti uhlíkových materiálů. Vyrábí se pomocí působení výkonného laserového pulsního systému v inertní argonové atmosféře na uhlíkový terčik při teplotách 10 000°C. Vnitřní struktura uhlíkové nanopěny se skládá z uhlíkových trubiček dlouhých 5 nm, které jsou navzájem pospojovány.



Obr. 22 Uhlíková nanopěna [29].

2.3.6 Uhlíkové nanotrubičky a nanorohy

Uhlíkové nanotrubičky (viz. obr. 23) a nanorohy patří v současnosti mezi nejmodernější uhlíkové materiály. Slouží jako základní materiály v nanotechnologiích. Mají také schopnost zachycovat velké objemy plynů. Některé formy uhlíkových nanotrubiček mají polovodivé elektrické vlastnosti. Nanotrubičky mohou být jednovrstvé i více vrstvé mají v celém objemu konstantní tloušťku. Využití nacházejí například v elektrotechnice, kde slouží jako vodiče s velmi malým odporem (elektrony se v nich mohou pohybovat téměř volně) nebo se používají jako skenovací sondy či detektory. Nanotrubičky se mohou také použít jako výztužný materiál pro kompozitní nanomateriály. [13, 20, 31, 32, 33]



Obr. 23 Uhlíkové nanotrubičky [30].

2.4 Uhlíková vlákna

Člověk se snaží o zhotovení uhlíkových vláken přibližně 120 let, ale příroda je zvládla vytvořit již v dávných geologických časech v některých ložiskách grafitu ve formě vláknitých krystalitů. Za otce uhlíkových vláken je oficiálně považován Edison, který v roce 1879 představil svůj vynález žárovky s karbonizovaným bambusovým vláknem. Skutečná výroba uhlíkových vláken začala až v 50. letech 20. století. Jednalo se o uhlíkové plstě vyráběné z rayonu (syntetické hedvábí) pro tepelné izolace. Významný pokrok nastal v roce 1959, kdy firma *Union Carbide* představila uhlíková vlákna s výraznými mechanickými vlastnostmi. Modul plasticity byl u těchto vláken zvýšen pomocí vytahování při velmi vysoké teplotě. V současnosti je vyráběno ročně několik tisíc tun uhlíkových vláken s vysokými charakteristikami (v roce 1990 to bylo přibližně 7000 tun a v roce 2004 bylo množství odhadováno na 18000 tun).

2.4.1 Uhlíkové vlákno

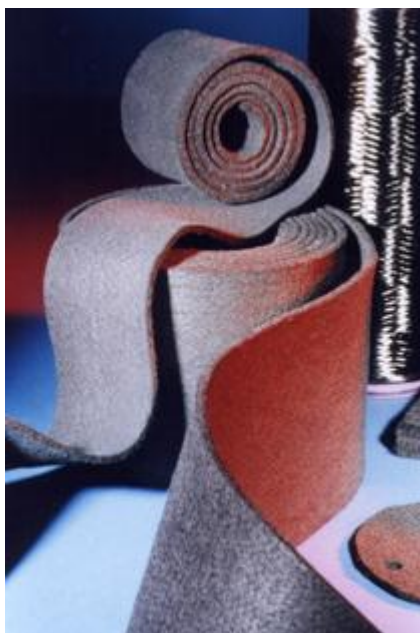
Uhlíková vlákna mají zcela odlišný způsob výroby oproti kovovým, skelným, křemenným nebo polymerním vláknům, protože na rozdíl od těchto vláken uhlík netaje, je dokonale odolný vůči rozpouštědlům a není tažný. Proto jsou uhlíková vlákna, stejně jako ostatní uhlíkové materiály, vyráběny pomocí řízené pyrolýzy organických prekurzorů. Tyto prekurzory musí mít již formu vlákna, případně plsti nebo textilie, protože karbonizace těchto netajících prekurzorů uchovává jejich tvar. Izotropní vlákna, případně plsti nebo tkaniny, takto získaná mají jen průměrné mechanické vlastnosti. Proto jako uhlíková vlákna budeme označovat až vlákna s vysokými mechanickými vlastnostmi, u kterých je odolnost mnohem vyšší než odolnost oceli a zároveň mají nižší hustotu.

Vlákna s vysokými mechanickými vlastnostmi jsou v dnešní době používána pro výrobu kompozitních materiálů, které nacházejí stále větší uplatnění zejména v oblasti leteckého průmyslu, kosmického výzkumu, automobilového průmyslu, pro výrobu různých sportovních potřeb a součástek pro další průmyslová odvětví.

2.4.2 Izotropní vlákna

V průběhu 70. let vznikla v Japonsku výroba izotropních vláken na bázi smol. Tyto vlákna jsou získávána pomocí tkaní ze smoly v proudu horkého vzduchu a mají pouze průměrné mechanické vlastnosti. Tento výrobní postup zaručuje netavitelnost

a umožňuje karbonizaci bez deformace nebo koalescencí mezi vlákny. Díky tomu lze získávat plsti (viz. obr. 24) nebo tkaniny, u nichž zůstávají vlákna izotropní.



Obr. 24 Uhlíková plst' pro izolaci [34].

Kvůli průměrným mechanickým vlastnostem nelze tyto vlákna, na rozdíl od vláken s vysokými parametry, používat pro výrobu výjimečných kompozitních materiálů. Nacházejí ovšem uplatnění jako výztuž betonových a cementových součástí ve formě 3 – 10 mm dlouhých, náhodně rozptýlených vláken nebo jako izolace pro vysokotepeelné použití ve formě tkanin a plstí.

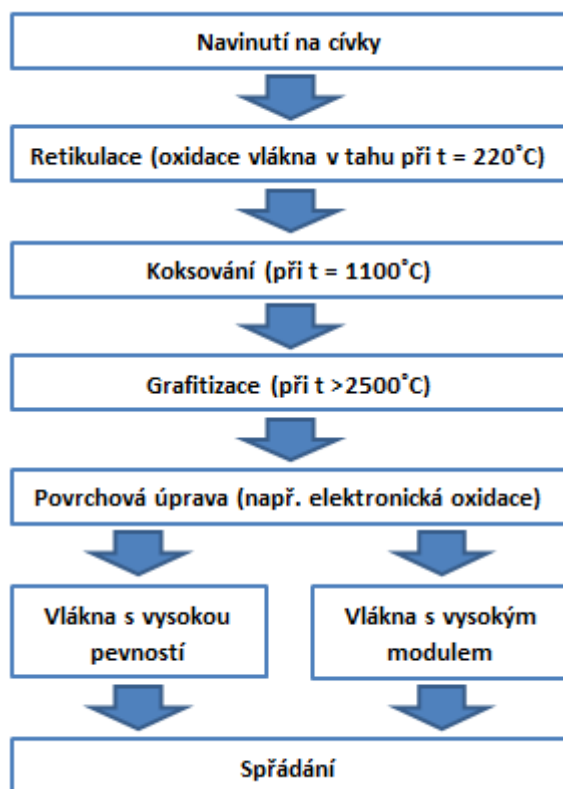
2.4.3 Vlákna s vysokými parametry

Tato vlákna mají vysoký modul pružnosti (230 – 930 GPa) a vysokou odolnost v tahu (3,5 – 7 GPa). Charakteristickým znakem vláken s vysokými parametry je značná anizotropie. Při porovnávání uhlíkových vláken s vysokými parametry s ostatními materiály zjistíme, že mají dvaapůlkrát vyšší pevnost oproti nejlepšímu oceli a pětkrát vyšší pevnost než lehké slitiny. Zároveň jsou mnohem odolnější než sklo a lehké slitiny. Další výhodou spočívá v nízké hustotě $1,7 - 2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ oproti $7,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ u oceli, $2,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ u lehkých slitin nebo $4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ u titanu. Díky těmto vlastnostem jsou tato vlákna velmi často využívána v aeronautice a v dalších odvětvích, kde se požaduje vysoká tuhost v kombinaci s nízkou vahou.

Vlákna s vysokými parametry si dále rozdělíme podle jejich prekurzoru na PAN, smoly (mezofáze) a podle jejich termálního zpracování. Vlákna na bázi umělého hedvábí (rayonu) se zabývat nebudeme, protože jsou v současné době málo rozšířena.

Vlákna na bázi PAN

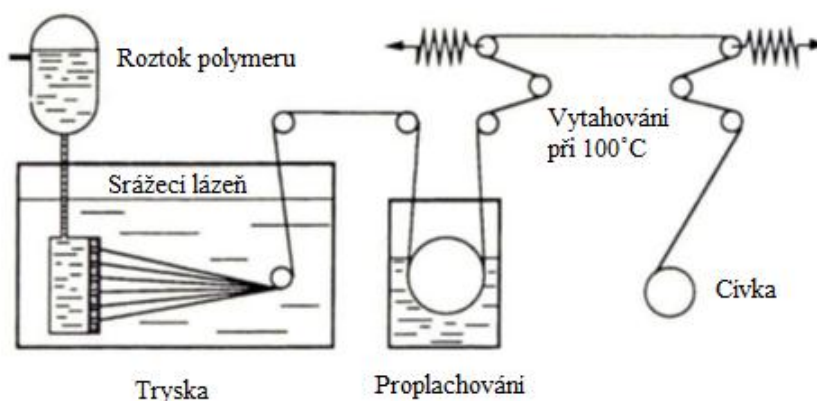
Uhlíková vlákna vyráběná z polyakrylonitrilu (PAN) jsou v dnešní době nejrozšířenější. Jako prekurzor se používá akrylové vlákno (ORLON). Schéma výroby vláken PAN je znázorněno na obr. 25.



Obr. 25 Modelové schéma výroby PAN vláken.

Kopolymer, který usnadňuje zvlákňování a zlepšuje vlastnosti uhlíkových vláken je v roztoku tlačeno skrz trysku. Ta je složena z 1000 – 300000 otvorů, které mají průměr v řádu desetin milimetru. Po průchodu tryskou se vlákna vytvoří buď ve srážecí lázni, nebo v proudu vzduchu po odpaření rozpouštědel. Následuje propláchnutí vláken a proces vytahování v prostředí s vodní párou, který je velmi důležitý, neboť se při tomto procesu orientují lamely do směru osy vlákna.

Nitě vzniklé při spřádání obsahují 3000 – 12000 vláken, každé o průměru několika mikrometrů. Nitě jsou dále navinuty na cívky a připraveny k retikulaci. Celý postup je znázorněn na obr. 26.



Obr. 26 Schéma spřádání [20].

Při stabilizaci je prekurzor převeden na netavitelné vlákno (termálně stabilní). Poté ho lze karbonizovat bez poničení vlákna při teplotách 200 – 300 °C. Při karbonizaci dochází ke vzniku kyslíkových můstků, které zajišťují vazbu mezi řetězci, zamezují měknutí a celkově stabilizují danou strukturu. Vytváření těchto můstků se označuje jako retikulace. Výsledný produkt má černou barvu a je podobný textilnímu vláknu. Je odolný plamenu a využívá se jako náhrada nebezpečného azbestu.

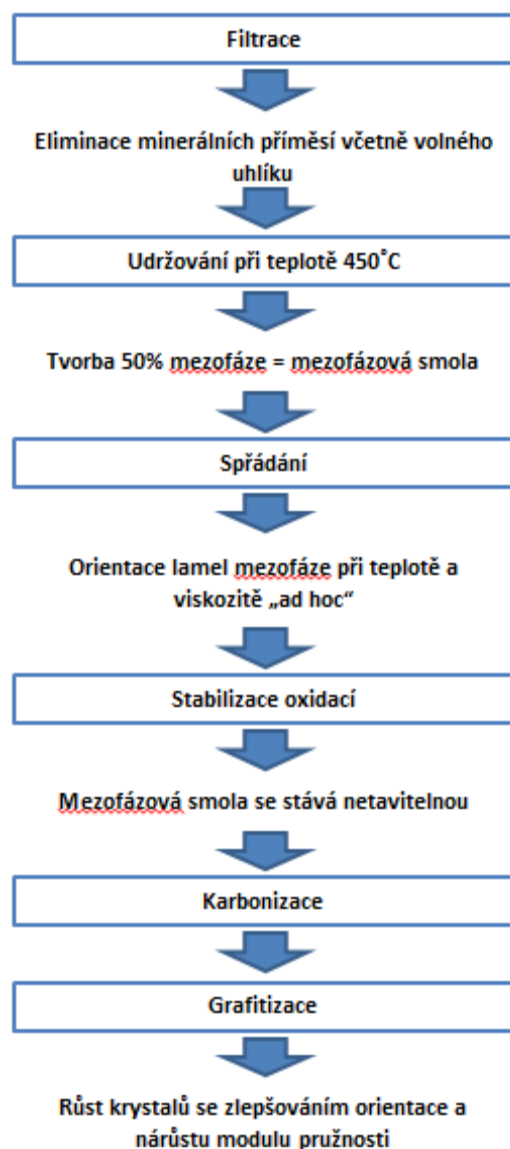
Vlákna získaná předchozím procesem jsou v atmosféře tvořené inertním dusíkem pyrolyzována za uvolňování těkavých toxických sloučenin (kyselina kyanovodíková). Výnosnost uhlíku je asi 50 %. Karbonizace probíhá obvykle v rozmezí teplot 1100 – 1400 °C. Nad teploty 1400 °C již nedochází ke zvyšování odolnosti vláken.

PAN vlákna jsou negrafitovatelná, ale v tomto případě označuje termín grafitizace termální operaci probíhající za teplot 2500 °C, při které dochází ke zlepšení uspořádání a nárůstu grafenových vrstev až do délky desítek nanometrů. Celý tento proces probíhá v přítomnosti inertních plynů jako dusík nebo argon v indukčních pecích. Výsledkem grafitizace je zlepšení modulu pružnosti.

Povrchové vlastnosti vláken ovlivňují mechanické vlastnosti výsledných kompozitních materiálů. Úprava povrchových vlastností má za úkol zvýšit přilnavost (adhezi) matrice k výtuzi. Nejčastěji se jako povrchová úprava používá kontrolovaná oxidace vláken. Ta může probíhat v plynném nebo kapalném prostředí. Při dokončování povrchových úprav bývá zpravidla na povrch vláken nanesen v tenké vrstvě polymer, který bude později sloužit jako matrice výsledného kompozitu.

Vlákna na bázi smoly nebo na bázi mezofáze

Černouhelné a ropné smoly nejčastěji používané pro výrobu těchto vláken jsou izotropní. Výsledná vlákna jsou proto také izotropní (ze smol lze však vyrábět i anizotropní uhlíková vlákna). Hmotnostní výtěžek je u vláken na bázi smoly okolo 80% proti 50% u vláken na bázi PAN nebo 25% u vláken z rayonu. Cena vláken na bázi smoly je však kvůli úsporám ve výrobě vláken na bázi PAN dodnes vyšší a to zejména kvůli vyšším výrobním nákladům. Schéma výroby je znázorněno na obr. 27.



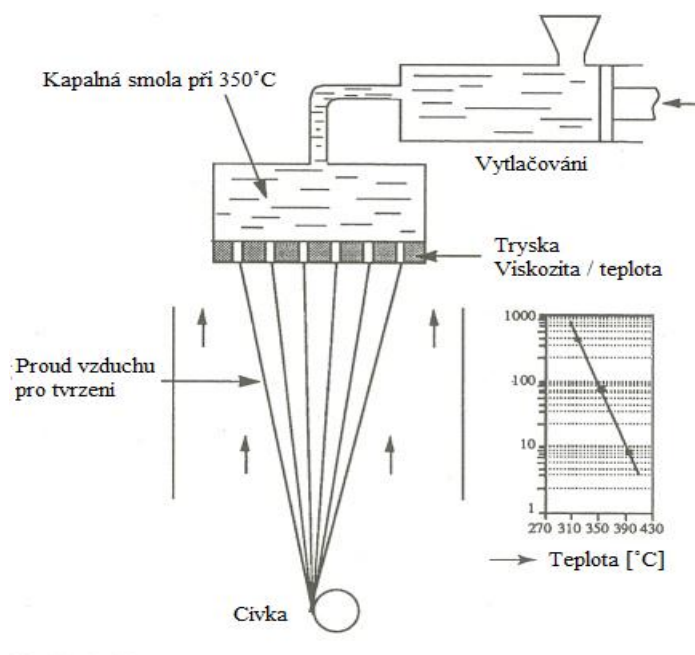
Obr. 27 Schéma výroby vláken na bázi mezofázové smoly [20].

Příprava smoly je velice důležitým krokem a musí splňovat následující podmínky:

- Viskozita (nárůst způsobuje zvýšení teploty, což je nežádoucí),
- bod měknutí,
- nepřítomnost netavitelných částic v suspenzi (netavitelné částice jsou tvořeny čistým uhlíkem nebo minerály),
- obsah uhlíku,
- průměrná molekulární hmotnost.

Při spřádání je skrz trysku, která je složená z kapilárních kanálků (o průměru několika desetin milimetru) vytlačována roztavená mezofázová smola o teplotě 350 – 380°C. To způsobí vyrovnání lamel s osou vlákna. Při průchodu kanálky v trysce dochází k postupnému chladnutí vláken, dokud se nestanou pevnými (výsledný poloměr vláken je 5 – 12 μm). Rychlost výstupu je několik set metrů za minutu. Celá operace je velmi komplikovaná, neboť při změně teploty se změní

i viskozita smoly a to může způsobit zpřetrhání vláken. Celý postup je znázorněn na obr. 28.



Obr. 28 Schéma spřádání [20].

Vlákna na bázi mezofázové smoly jsou na rozdíl od vláken na bázi PAN grafitovatelná a mají strukturu polykrystalického grafitu. Prováděné procesy jsou obdobné jako v případě vláken PAN, ale výroba je celkově snadnější. U mezofáze není zapotřebí provádět natahování vláken, pro získání orientované struktury. Grafitizace je snadnější a probíhá za teplot 2800°C.

Uhlíková vlákna s vysokými parametry se využívají v kombinaci s kovovou, keramickou, uhlíkovou nebo pryskyřicovou maticí k výrobě kompozitních materiálů. Díky uhlíkovým vláknům má kompozit velmi dobrou odolnost vůči únavě, výborně tlumí vibrace, je odolný korozi, má nízký koeficient roztažnosti a může být žáruvzdorný.

V oblasti kompozitů typu vlákno-pryskyřice došlo v posledních desetiletích ke značnému rozvoji. Uhlíková vlákna mají proti ostatním vláknům, jako jsou skelná, bórová, aramidová, mnohem lepší vlastnosti vztažené k specifické hmotnosti a jsou proto využívána zejména v oblasti letectví a kosmonautiky.

Tab. 3 Vlastnosti vláken s vysokými parametry

| Vlákno na bázi | Průměr vlákna [mm] | Specifická hmotnost [g·cm ⁻³] | Pevnost v tahu [MPa] | Modul pružnosti [GPa] | Elektrický odpor [μΩ·cm ⁻¹] |
|----------------|--------------------|---|----------------------|-----------------------|---|
| PAN BT | 7 | 1,77 | > 3500 | 240 | 1500 |
| PAN HT | 7 | 1,9 | > 2000 | >380 | 650 |
| PAN IM | 5 | 1,8 | >5500 | 300 | 1300 |
| Smoly BT | 10 | 2 | 2000 | 380 | 850 |
| Smoly HT | 10 | 2,2 | 2200 | 700 | 250 |

BT => 1100°C

HT => 2500°C

IM = Intermediární modul

Teoreticky mohou mít uhlíková vlákna modul pružnosti 1000 GPa a pevnost 20GPa. V laboratorních podmínkách již bylo dosaženo 90% těchto hodnot. Proto můžeme v blízké budoucnosti očekávat u komerčních vláken zlepšení vlastností. Další vývoj směřuje ke snížení ceny standartních uhlíkových vláken a tím i jejich většímu a snazšímu využití.

Uhlíková vlákna nacházejí největší uplatnění ve výrobě kompozitních materiálů. V menší míře se využívají díky své biologické snášenlivosti s živou tkání i v lékařství pro umělé šlachy a vazy, v textilním průmyslu pro různé tkaniny a ve stavebnictví jako výztuž pro betonové součásti a jako vysokotepelná izolace. [13, 20, 22, 25]

2.5 Kompozitní materiály

V případě kompozitních materiálů se uhlíková vlákna kombinují s pryskyřicovou matricí (do teplot 200°C), kovovou, skelnou nebo keramickou matricí (pro zvýšené teploty) a s uhlíkovou matricí (teploty až 2500°C).

2.5.1 Kompozit vlákno-pryskyřice

Za posledních 40 let dosáhly uhlíkové kompozity vlákno-pryskyřice velkého rozvoje. Uhlíková vlákna jsou díky svým výjimečným vlastnostem nejčastěji používaná výztuž pro kompozitní materiály a vysokých užitných vlastností. Kompozity s uhlíkovými vlákny mají několikanásobně větší odolnost než u běžných materiálů jako je ocel a lehké slitiny a zároveň jsou dvakrát až pětkrát lehčí a mají zanedbatelný koeficient roztažnosti.

Výroba

Pro výrobu kompozitů vlákno-pryskyřice se nejčastěji volí prepregy, které mají standardně u jednosměrného uspořádání výztuže šířku 300 mm a u výztuže ve formě textilie šířku 1 – 1,2 m. Tloušťka těchto pásů je 1 – 3 mm a obsah pryskyřice okolo 35%. Prepregy mohou být dodávány ve formě rolí oddělené ochrannou vrstvou a následně skladovány po několik měsíců. Kompozity z výchozích vláken nebo prepregů jsou vyráběny navíjením, protlačováním nebo formováním. Jako matrice se používají pro svou snadnou manipulaci, výbornou adhezi k vláknům a odolnost vůči vnějším vlivům epoxidové pryskyřice. Pokud je u kompozitu vyžadována odolnost proti teplotám nad 200°C, používá se polyimidová pryskyřice.

Aplikace

Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken zprvu vyhovovali především požadavkům leteckého a kosmického průmyslu, neboť jsou dostatečně odolné a zároveň lehké. Právě proto se stali významným materiálem pro aplikaci v těchto odvětvích a jejich využití nadále roste i do oblastí sportovních potřeb a lékařství.

Rozdělení spotřeby kompozitů ve světě:

- 40% letectví a kosmonautika,
- 40% sport,
- 20% ostatní průmysl.

Aplikací v oblasti leteckého průmyslu se budeme zabývat později v další kapitole.

V posledních letech značně narůstá využití kompozitů z uhlíkových vláken v oblasti sportovních potřeb a doplňků jako jsou například: lyže, rámy cyklistických kol, draky větroňů, hokejky, golfové hole, stěžně a trupy lodí a uplatnění našli i v oblasti konstrukce hudebních nástrojů (viz. obr. 29, 30, 31).



Obr. 29 Lyže [35].



Obr. 30 Housle [36].



Obr. 31 Rám jízdního kola [37].

Jak již bylo řečeno, největší využití kompozitů s uhlíkovými vlákny je v oblasti letectví a sportovních potřeb. Pronikání do dalších oblastí je spíše pozvolné a to především kvůli vysoké ceně a také kvůli jistému odporu výrobců měnit zaběhlé postupy a materiály.

Cena uhlíkových vláken klesla od 70. let minulého století přibližně na třetinu (30 – 40 USD). To by mohlo vést k většímu rozšíření do automobilového průmyslu, kde se již testují například sloupky řízení a díly podvozků pro sériové modely. Další uplatnění by mohly uhlíková vlákna nalézt i při konstrukci zemědělských strojů, jeřábů, rámu obráběcích strojů, kol větrných elektráren a mnoho dalších, kde by se využilo tuhosti a schopnosti tlumení vibrací, které kompozit uhlík-pryskyřice nabízí. Zároveň by se dosáhlo výrazného snížení hmotnosti těchto strojů.

2.5.2 Kompozit s matricí kov, sklo a keramika

Použitím uhlíkových vláken pro vyztužení křehkých matric jako sklo a keramika se dosáhne zvýšení odolnosti proti šíření prasklin. Díky tomu mohou být tyto matrice použity pro výrobu velkorozměrných struktur a objemů pro aplikaci v korozivním prostředí a za vysokých teplot.

Tab. 4 Pevnost vybraných kompozitů v tahu

| Kompozit | Masivní [MPa] | Vyztužený vlákny [MPa] |
|---------------|---------------|------------------------|
| Sklo | 60 | 700 |
| Lehká slitina | 500 | 1050 |
| Měď – Chrom | 380 | 1500 |
| Slitina Pb | 70 | 800 |

Kompozity s keramickou matricí jsou v dnešní době převážně ve fázi vývoje. Pro keramickou matrici se hodí materiály jako: Al_2O_3 , SiC, MgO, SiO_3 , ZrO_2 a mnohé další. Díky použití uhlíkových vláken se dosáhne zvýšení odolnosti proti teplotnímu šoku, snížení hustoty a křehkosti, která je kvůli keramické matrici značně vysoká. Uhlíková vlákna musí mít při použití keramické matrice vhodnou povrchovou úpravu pro zlepšení vazby matrice-vlákno.

Kompozity se skelnou matricí jsou také ve fázi zkoumání a použití uhlíkových vláken má přinést podobné zlepšení jako u keramické matrice.

Použití kovové matrice je jako u keramické a skelné také ve fázi zkoumání. Experimentuje se se slitinami Ti, Al, Sr, Pb, Mg, a Cu. U kovové matrice se dosáhne při použití uhlíkových vláken zlepšení tuhosti a pevnosti výsledného kompozitu za normálních i zvýšených teplot. Dále dojde ke snížení hustoty, únavové a creepové vlastnosti se výraznělepší a zvýší se odolnost proti opotřebení.

Výroba

Výroba těchto kompozitů může být prováděna infiltrací uhlíkových vláken v kapalně nebo plynné fázi. [20] Dále může být tato součást vstříkována do formy s vlákny nebo lze preimpregnovat vlákna a následně vytvarovat prepregy do forem.

Aplikace

V dnešní době je využití kompozitů s kovovou nebo keramickou matricí velmi malé. Díky jejich výhodám se plánuje využití v tepelných motorech a plynových turbínách, kde by umožnili zvýšení provozní teploty a tím i zvýšení výkonu a také by mohli sloužit pro výrobu pouzder vysoce zatížených ložisek.

2.5.3 Kompozit uhlí-uhlík

Kompozity uhlík-uhlík jsou nejvhodnější pro použití v extrémních podmínkách. Uhlík si jako jediný materiál dokáže zachovat své mechanické vlastnosti při teplotách vyšších než 1500°C . Do teplot 2500°C se jeho vlastnosti dokonce zlepšují. A díky ostatním výhodným vlastnostem jako například žáruvzdornost, odolnost, nízká váha, rozměrová stálost našel kompozit uhlík-uhlík velké uplatnění v oblasti kosmických zařízení.

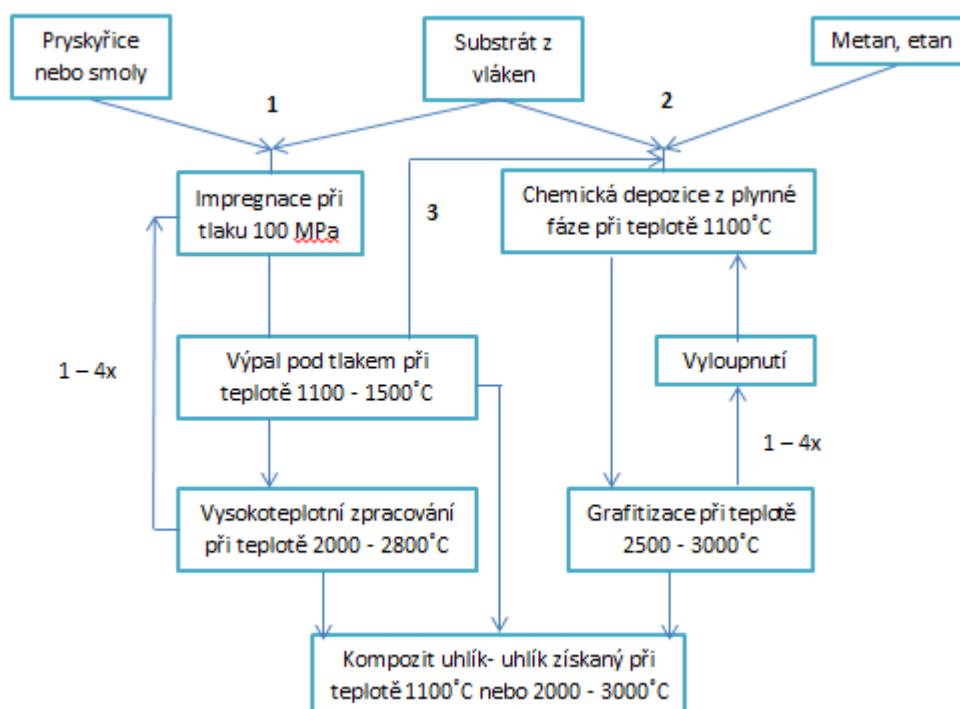
Kompozit uhlík-uhlík se skládá z uhlíkových vláken a uhlíkové matrice a jeho vlastnosti lze přizpůsobovat charakterem a dispozicí vláken nebo povahou, způsobem výroby a hustotou matrice.

Výroba

Pro výrobu kompozitu existuje několik odlišných postupů, které se liší způsobem zpracování matrice, kterou lze získat:

- Pomocí impregnace vláken pryskyřicí nebo smolou,
- pomocí depozice z plynné fáze,
- kombinací obou předešlých postupů.

Schéma výroby je znázorněno na obr. 32.



Obr. 32 Schéma výroby kompozitu uhlík-uhlík.

První postup spočívá v prosycení substrátu pryskyřicí nebo smolou a následném vypálení. Poté je provedena zhutňovací impregnace a jako poslední operace je provedena vysokoteplotní úprava, která může končit grafitizací.

V druhém postupu je výroba matrice uskutečněna chemickou depozicí z plynné fáze. Poté je provedena vysokoteplotní úprava a odlupování svrchní vrstvy, což usnadní difúzi plynů a zamezí vzniku povrchového povlaku, který se na polotovaru může vytvořit. Poté se celý cyklus opakuje.

Třetí postup obsahuje předchozí dva postupy.

Aplikace

Vlastnosti kompozitu závisí na mnoha parametrech (kvalita použitých vláken, způsob výroby, rozložení vláken). Charakteristické vlastnosti jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 5 Charakteristické vlastnosti kompozitu uhlík-uhlík

| Vlastnost | Hodnota |
|---|------------|
| Specifická hmotnost [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$] | 1,4 – 2 |
| Pevnost [MPa] | 60 – 700 |
| Modul [GPa] | 25 – 380 |
| Odpor [$\mu\Omega\cdot\text{cm}^{-1}$] | 500 – 3000 |

Pomocí různých postupů výroby lze u kompozitu uhlík-uhlík dosáhnout tížených vlastností. Kompozity uhlík-uhlík mají velmi nízkou specifickou hmotnost (méně než $2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) a zároveň vysokou teplotní odolnost. Do teplot 2500°C dochází ke zlepšení pevnosti, tuhosti a odolnosti. Dále mají malý součinitel teplotní roztažnosti, velmi dobrou teplotní odolnost a dobrou pevnost v únavě.

Jedinou nevýhodou uhlíkových kompozitů je odolnost při vysokých teplotách v oxidační atmosféře. Tento nedostatek lze však relativně snadno eliminovat pomocí různých druhů povlaků. Tyto povlaky mohou být:

- Z vzácných kovů (pomocí depozice z plynné fáze),
- křemíkováním (karbid křemíku),
- impregnací pomocí různých sloučenin.

Díky žáruvzdornosti a odolnosti vůči odtavování (ablací) nachází kompozit uhlík-uhlík uplatnění při aplikaci v prostředí horkých plynů a v oblasti výroby tepelných štítů (nos a náběžné hrany křídel raketoplánů, části raket a balistických střel) pro návrat do atmosféry v aeronautice (viz. obr. 33). Používá se také pro konstrukce nosičů zařízení a zrcadel u družic.



Obr. 33 Tepelná ochrana z kompozitu uhlík-uhlík na raketoplánu [38].

Pro své vynikající termomechanické vlastnosti nalézá kompozit uhlík-uhlík uplatnění i ve výrobě forem pro slinutí kovů, keramiky a karbidu wolframu, pro sklářský průmysl, v konstrukci pecí a reaktorů a pro explosivní pýchování kovů.

Díky tomu, že je uhlík součástí tavby molekul v lidském těle, je kompozit uhlík-uhlík výborným biomateriálem. Oproti kovům nenarušuje růst tkání a nezpůsobuje žádnou negativní reakci s krví. Po čase se dokonce jeho porozita vyplní tkání a tím dojde k dokonalému spojení. V lékařství se v nejbližších letech očekává rozšíření použití kompozitu uhlík-uhlík pro kostní protézy, zubní implantáty, destičky pro osteosyntézu, svalové protézy, srdeční chlopně, umělé ledviny a plíce apod.

Kompozit uhlík-uhlík má také výborné otěrové a třecí vlastnosti. Koeficient tření se s teplotou nemění, mají vysokou pevnost v únavě a otěru oproti klasickým materiálům a dobrou mechanickou a tepelnou odolnost proti šoku. Díky těmto vlastnostem se výborně hodí pro použití v konstrukci brzdových zařízení u letadel (viz. obr. 34) a závodních motocyklů a automobilů, kde mají čtyřikrát vyšší účinnost oproti klasickým materiálům a zároveň umožňují snížení váhy (500 kg u Airbusu A320). Široké uplatnění našel kompozit uhlík-uhlík také u ložisek a jejich pouzder, které pracují za vysokých teplot.



Obr. 34 Brzdové disky z letounu Boeing 757 [39].

Kompozitní materiály na bázi uhlík-uhlík nalézají v dnešní době velké uplatnění a jejich použití se neustále rozšiřuje především tam, kde se využívá jejich skvělých vlastností a vyšší cena těchto materiálů není překážkou pro jejich aplikaci. [14, 20, 22]

3 POUŽITÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ NA BÁZI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN V LETECTVÍ

V civilním i vojenském letectví se využívají především uhlíkové kompozity vlákno-pryskyřice pro výrobu strukturních elementů, jako jsou například směrovky, křídélka, součásti trupu, nosné díly podlah a výztuhy sedadel. Díky schopnosti tlumit vibrace jsou tyto kompozity využívány i u konstrukce vrtulníků (letové listy). Podíl kompozitních materiálů v oblasti letectví a kosmonautiky rok od roku neustále zvyšuje.

3.1 Použití kompozitových dílů u dopravních letadel

Kompozitní materiály nahrazují běžně používané materiály jako je ocel a hliník, protože díky kompozitním materiálům lze zredukovat hmotnost o 20 – 30%. Použití kompozitních materiálů přináší také úsporu výrobních nákladů, protože lze vyrábět složité díly z jednoho kusu.

Nejčastěji se v leteckých konstrukcích využívají kompozity s polymerní maticí a uhlíkovými vlákny (Carbon fiber reinforced polymer). Díky nízké hmotnosti a výborným mechanickým vlastnostem patří uhlíková vlákna k nejpoužívanější výztuži pro kompozity používané v letectví. Jedna z mála nevýhod uhlíkových vláken představuje jejich křehkost.

Boeing 737

Na drak letadla Boeing 737 (viz. obr. 35) je použito 680 kg kompozitních dílů, díky kterým bylo uspořeno 270 kg oproti klasickým kovovým dílům.



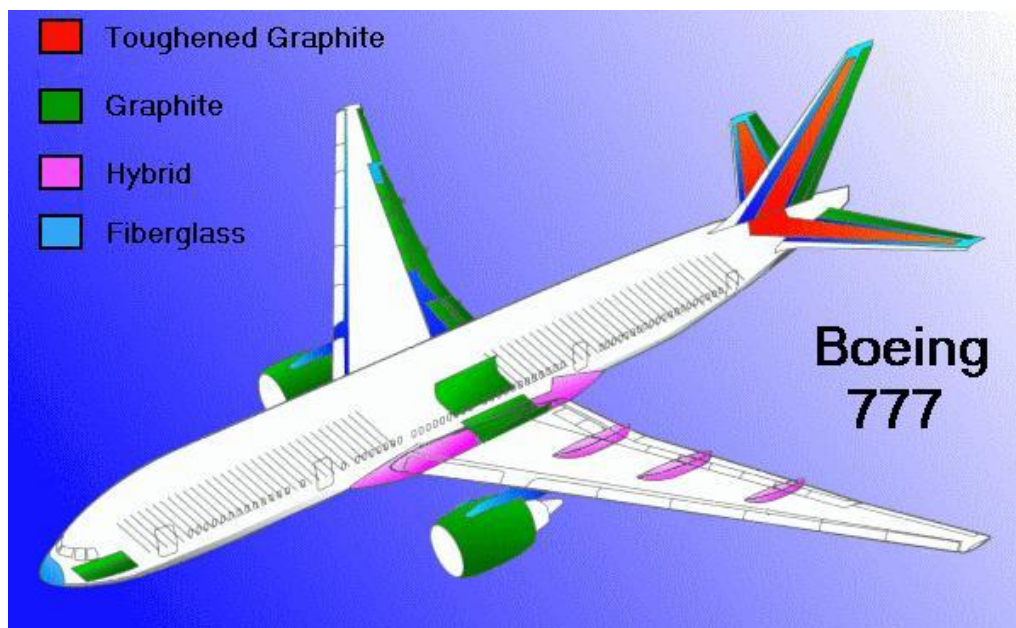
Obr. 35 Boeing 737 [40].

Lockheed Martin/Boeing F-22 Raptor

Americký stíhací letoun Lockheed Martin/Boeing F-22 Raptor je vyroben z titanových slitin (39% celkové hmotnosti), kompozitních materiálů (24% celkové hmotnosti), letecké hliníkové slitiny (16% celkové hmotnosti) a termoplastů (1% celkové hmotnosti).

Boeing 777

Na obr. 36 je znázorněno schéma složení draku dopravního letounu Boeing 777.



Obr. 36 Dopravní letoun Boeing 777, Toughened graphite – tvrzené uhlíkové vlákno, Graphite - uhlíkové vlákno, Hybrid – hybridní tkaniny, Fiberglass – skelné vlákno [41].

Boeing 787 Dreamliner

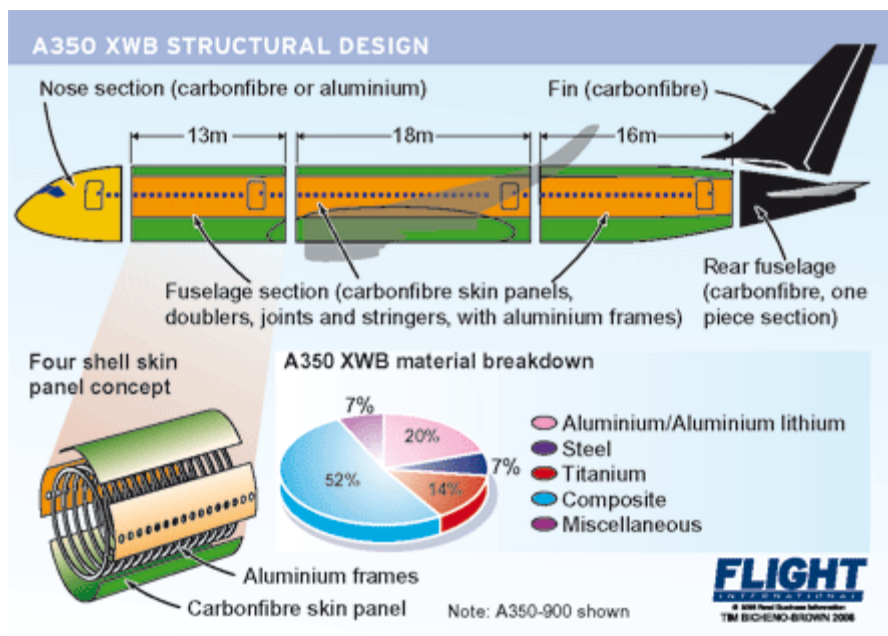
U tohoto letounu se kompozity podílí na celkové hmotnosti 50%. Kompozitní materiály tvoří většinu trupu, křídla a ocas, jak ukazuje obr. 39.



Obr. 39 Boeing 787 Dreamliner [42].

Airbus A350 XWB

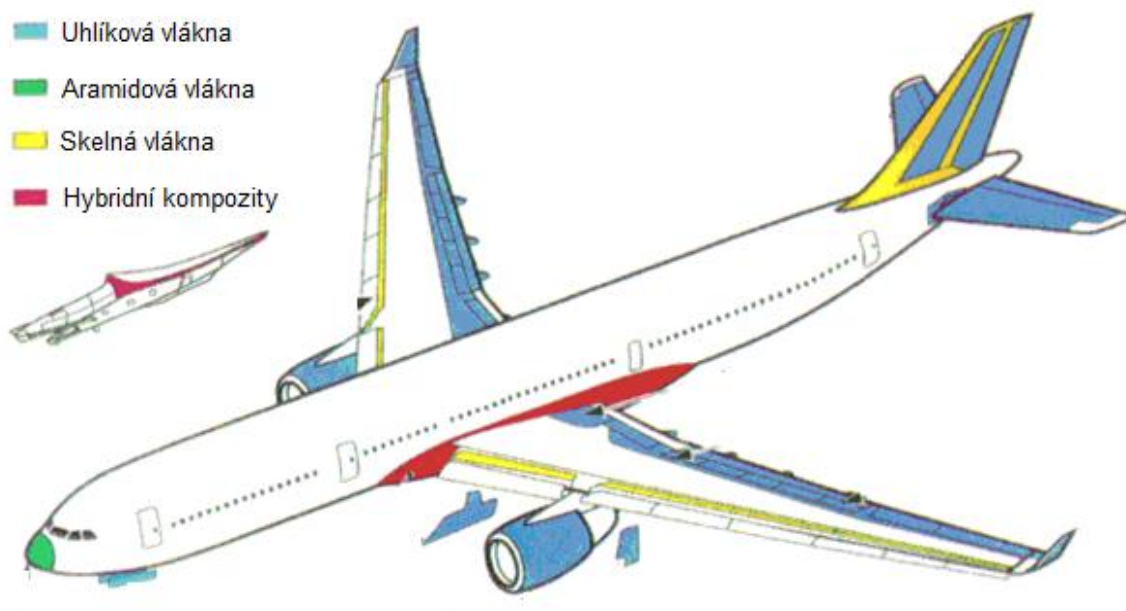
V konstrukci tohoto dopravního letounu bylo použito několik monobloků z karbonu, největší z nich o ploše 36 m². Celkově se kompozity podílí 52% na celkové hmotnosti letounu včetně hlavních prvků. Trup je sestaven z velkých panelů z uhlíkových vláken. Celé schéma je na obr. 37.



Obr. 37 Schéma Airbusu A350 XWB [43].

Airbus A330

Schéma složení dopravního letounu Airbus A330 je znázorněno na obr. 38.



Obr. 38 Letoun Airbus A330 [44].

[1, 22, 45, 46]

3.2 Použití kompozitových dílů v leteckém průmyslu ČR

Zatímco ve velkém letectví v ČR je použití kompozitů minimální v oblasti malého letectví a UL dochází k masivnímu využití kompozitových materiálů v konstrukci, především díky pokračujícímu velkému rozvoji výroby v této oblasti.

Mezi požadavky na letoun v kategorii sportovního létání jsou:

- vysoké výkony
- vysoká cestovní rychlost
- velké dolety při nízké spotřebě a nízkých provozních nákladech

To je možné pouze za předpokladu dokonalé aerodynamiky letounu dosažené při nízké ceně. Kompozity toto umožňují. Tvarování povrchu letounu, dodržení přesnosti tvarů profilu křídla a kvalita povrchu je u kompozitních konstrukcí na kvalitativně vyšší úrovni než u plechových klasických konstrukcí. Vývoj a výroba letounu z kompozitních materiálů je však nákladnější, zejména díky drahé výrobě laminátových forem pro laminování dílů. Výroba se proto vyplatí až při výrobě desítek až stovek letounů.

Z hlediska dalšího vývoje konstrukcí je trend vzhledem k požadavkům na výkony UL doprovázené tlakem na minimální prázdnou váhu více využívat sendvičové konstrukce s použitím uhlíkových tkanin.

Letoun VIVA

Ultralehký letoun VIVA (viz. obr. 40, 41) je dvoumístný motorizovaný kluzák nové generace s motorovou jednotkou v přední části trupu. Veškeré díly a komponenty jsou sestavovány výhradně firmou Composit Airplanes s r.o.

Křídla letounu VIVA jsou čtyřnásobně lichoběžníková vyrobená z uhlíkových vláken. Konstrukce kormidla ve tvaru T vychází z letounu Apis. Centrální skříňový nosník vyrobený z uhlíkových vláken přebírá nosnou funkci v konstrukci trupu letounu. Pro trub letounu byl použit sendvič ze skelných vláken.

Technické informace o motorizovaném ultralehkém kluzáku VIVA:

| | |
|---------------------|--|
| Rozpětí: | 17 m |
| Přepravní kapacita: | 2 osoby |
| Pohon: | čtyřtaktní motorizovaná jednotka o výkonu 44kW v přední části trupu se sklopnou vrtulí typu Contax |
| Stoupavost: | 3-4 ms ⁻¹ |



Obr. 40 Letou VIVA [47].



Obr. 41 Letoun VIVA [47].

ZÁVĚR

Touha leteckých konstruktérů neustále zvyšovat výkonnost vojenských i dopravních letadel je hnací silou vývoje nových a dokonalejších materiálů. Kompozitní materiály patří mezi velmi perspektivní materiály, které hrají významnou roli v současných i budoucích leteckých aplikacích. Kompozity jsou pro letectví atraktivní zvláště kvůli své výjimečné pevnosti a tuhosti při nízké měrné hmotnosti.

Nejznámější kompozitní materiály, používané v letectví, jsou kompozity na bázi uhlíkových vláken s polymerní matricí. Uhlíková vlákna jsou poměrně tuhá a pevná (vzhledem k jejich měrné hmotnosti), ale křehká. Používaná polymerní matrice je relativně tvrdá, ale nijak zvlášť tuhá ani pevná. Kombinací těchto materiálů je však získán kompozitní materiál s výhodami obou složek (vysoká pevnost, tuhost, houževnatost a nízká měrná hmotnost) při potlačení negativních vlastností obou dílčích materiálů.

Výhodou vláknových uhlíkových kompozitů je i možnost konstrukce komponentů „na míru“ s ohledem na zatížení a kritická místa, např. na koncentrátoři napětí. Dalším kladem je také možnost výroby tvarově složitých součástí, které z klasických kovových materiálů nelze vytvořit jako jeden celek. Tím lze snížit počet spojů a zjednodušit montáž provozních celků. Použití kompozitních materiálů v komerční dopravě je zajímavé i tím, že snížená hmotnost letadla umožňuje lepší hospodaření s palivou a tím snižuje provozní náklady.

Konvenční kovové materiály a jejich slitiny hrají a budou hrát důležitou roli v leteckých konstrukcích. Zároveň však není pochyb o tom, že značné výhody, které nabízí kompozitní materiály, budou nadále rozvíjeny a kompozitní materiály budou hrát stále významnější roli.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů. [online]. 14.12.2005 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: 1. <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>
2. KOŘÍNEK, Zdeněk. KOMPOZITY: Historie. [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/historie.pdf>
3. Janovec, J. – Cejp, J. – Steidl, J.: Perspektivní materiály, Praha, Vydavatelství ČVUT, 2001
4. Ptáček, Luděk. Nauka o materiálu. II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s ISBN 80-7204-568-3
5. Kratochvíl, B.; Švorčík, V.; Vojtěch, D.. Úvod do studia materiálů. Praha: VSCHT, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4
6. Chung, Deborah D. L. Composite materials: functional materials for modern technologies. London: Springer, 2003. 289 s. ISBN 185233665X
7. KOŘÍNEK, Zdeněk. KOMPOZITY: Matrice. [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/matrice.pdf>
8. BAREŠ, Richard. Kompozitní materiály. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988, 325 s.
9. JANČÁŘ, J.: Úvod do materiálového inženýrství kompozitů, FCH VUT, Brno, 1999
10. Laš, V.: Mechanika kompozitních materiálů. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-273 – X.
11. KOŘÍNEK, Zdeněk. KOMPOZITY: Vlákna. [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
12. Glass fiber. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Glass_fiber
13. GRÉGR, Jan. Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken [online]. Říjen 2004, [cit. 2010-04-10]. Dostupné z: http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy/%5B3.1.09%5D.pdf.
14. Technologie výroby kompozitů. [online]. 30.12.2005 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>
15. KOŘÍNEK, Zdeněk. KOMPOZITY: Technologie výroby: Vlákna. [online]. [cit. 2012-05-18]. <http://www.volny.cz/zkorinek/technologie.pdf>

16. Fázové diagramy. [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: http://www.sci.muni.cz/mineralogie/kap_6_5_diagram/obrazek65_1.htm
17. STRUKTURNÍ TYPY. [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.chemi.muni.cz/~lobl/Projekt/Projekt.html>
18. KUCHARČÍK, J. Měřicí pracoviště rezistivity pro kompozitní materiály. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Vognar.
19. Perspektivní materiály: Krystalové modifikace uhlíku. [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/FMkomplet4.htm>
20. LEGENDRE, André. *Uhlíkové materiály: Od černé keramiky k uhlíkovým vláknům*. Vyd. 1. Praha: Informatorium, 2001. 173 s. ISBN 80-86073-82-3
21. PIERSON, H.O. *Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes: Properties, Processing and Applications*. Park Ridge NJ: Noyes Publications, 1993. 419 p. Digitální kopie dostupná také z: <<http://www.scribd.com/doc/8968836/HOperson-Handbook-of-Carbon-Graphite-Diamond-and-Fullerenes>>. ISBN 0-8155-1339-9.
22. MORGAN, Peter. *Carbon fibers and their composites*. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2005. 1153 p. ISBN-10 0-8247-0983-9 ISBN-13 978-0-8247-0983-9
23. Grafitizace. [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1097276511004527>
24. Pyrolýza. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 16. 5. 2012 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Pyrol%C3%BDza>
25. PIERSON, H.O. *Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes: Properties, Processing and Applications*. Park Ridge NJ: Noyes Publications, 1993. 419 p. Digitální kopie dostupná také z: <<http://www.scribd.com/doc/8968836/HOperson-Handbook-of-Carbon-Graphite-Diamond-and-Fullerenes>>. ISBN 0-8155-1339-9
26. Ohebný grafit. [online]. [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: http://www.asbestoscentre.net/Exporters_Suppliers/Exporter26242.738362/Pure-Expanded-Flexible-Graphite-Packing.html
27. Long-Term Follow-up of Pyrolytic Carbon Metacarpophalangeal Implants. The Journal of Bone & Joint Surgery [online]. 01.05.1999 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://jbjs.org/article.aspx?Volume=81&page=635>
28. New Material Is Capable Of Eliminating Pollutants By The Hydrocarbon Industry. *Science News* [online]. 26.02.2008 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.sciencedaily.com/releases/2008/02/080226112755.htm>

29. *Aldebaran Bulletin: Pátá forma uhlíku - nanopěna s feromagnetickými vlastnostmi* [online]. Aldebaran Group for Astrophysics, 2004 [cit. 2012-05-18]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_25_uhl.html
30. TOON, John. *Mimicking Gecko Feet: Dry Adhesive Based on Carbon Nanotubes Gets Stronger, with Directional Gripping Ability* [online]. 2008, 10.9.2008 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://gtresearchnews.gatech.edu/mimicking-gecko-feet/>
31. Balík K., Špaček F., Grégr J.: 1991, Některé progresivní uhlíkové materiály, *Ceramics Silikáty* 35, 155–164.
32. ŽÁČEK, Martin. Pátá forma uhlíku – nanopěna s feromagnetickými vlastnostmi. *Aldebaran bulletin* [online]. 2004, roč. 2, č. 5 [cit. 2010-04-16]. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_25_uhl.html
33. DUMÉ, Belle. *Carbon nanotubes, but without the 'nano'* [online]. Aug 8, 2008 [cit. 2010-04-21]. Dostupné z: <http://physicsworld.com/cws/article/news/35364>
34. Plst' a izolace. [online]. 2010 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.morganamt.com/cz/Products/Felt-and-Insulation.htm>
35. Audi Carbon Ski. [online]. 2011, 10.2.2011 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.vw-scene.cz/predstavujeme/3142-audi-carbon-ski.html>
36. Carbon Fiber Cello from Luis and Clark. [online]. 2009, 21.1.2009 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.bornrich.com/entry/carbon-fiber-cello-from-luis-and-clark/>
37. Desatero: Jak vybrat správné jízdní kolo. [online]. 2010, 17.6.2010 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.fitkastudia.cz/cz/doporucujeme/desatero-jak-vybrat-spravne-jizdni-kolo?start=65>
38. STANĚK, Roman. Astronauti z ISS se "prošli" vesmírem. [online]. 2006, 10.7.2006 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://aktualne.centrum.cz/clanek.phtml?id=187303>
39. Carbon / carbon composite brake. [online]. 2010 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.metallurgy-composite-materials.com/products/Carbon-carbon-composites/201/>
40. Garuda Boeing 737-800 from AirTeamImages. [online]. 2011 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.flightglobal.com/airspace/media/garudaindonesia/garuda-boeing-737-800-from-airteamimages-82519.aspx>
41. Composite Materials. [online]. 2010, 28.03.2010 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.aviation-history.com/theory/composite.htm>

42. PATTERSON, Jim. New Large Aircraft Composite Fire Fighting. [online]. 2012, 02.24.2012 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.airporttech.tc.faa.gov/Safety/Patterson2.asp>
43. OGELAAR, Rob. A350 XWB first composite lay-up manufactured in Nantes. [online]. 2009, 04.12.2009 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.aviationnews.eu/2009/12/04/a350-xwb-first-composite-lay-up-manufactured-in-nantes/>
44. HOBBS, Chris. Improving the Reliability, Quality and Cost-effectiveness of the Inspection of Safety Critical Structures. [online]. 1997 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/aero1197/aero5145/aero5145.htm>
45. Composite materials for the aerospace industry [online]. May 2003 [cit. 2010-05-01]. Dostupné z: http://www.hexcel.com/NR/rdonlyres/6024A993-B189-4162-9A62-064C792DC425/0/Aerospace_Brochure.pdf
46. ASM Handbook volume 21, Composites. ASM International, 2001. 2605 s
47. Fotogalerie ultralehkého letadla VIVA. [online]. 2009 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://www.viva-ultralight.cz/cs/fotogalerie/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Zkratka | Jednotka | Popis |
|------------------|----------|---|
| GFEC | [-] | Groupe Français d'Etude des Carbones |
| HM Fiber | [-] | Uhlíková vlákna s vysokým modulem (High Modulus Fiber) |
| HT Fibers | [-] | Vysoce pevná uhlíková vlákna (High Tensile Fibers) |
| IM Fibers | [-] | Uhlíková vlákna se středním modulem (Intermediate Modulus Fibers) |
| PAN | [-] | Polyacrylonitrile |