

## Přehledný referát

### NĚKTERÉ PROGRESÍVNÍ UHLÍKOVÉ MATERIÁLY

KAREL BALÍK, FRANTIŠEK ŠPAČEK

*Ústav geotechniky ČSAV, V Holešovičkách 41, 182 09 Praha 8*

JAN GRÉGR

*Monokrystalý Turnov, Přepěšská 1447, 511 01 Turnov*

V posledních 30 letech došlo ve vyspělých zemích k výraznému rozvoji výroby speciálních uhlíkových materiálů a to nejen vlivem znovuoobjevení některých materiálů starých více jak 100 let, ale zejména díky propracování technologií výroby těchto látek. Vlastnosti vazby mezi uhlíky, její hybridizace a nové technologické postupy umožňují široké spektrum vlastností uhlíkových materiálů. V některé formě je uhlíkový materiál tepelným vodičem, v jiné izolátorem. Může být vyroben s téměř teoretickou hustotou, jindy zase jako velmi lehký materiál. Uhlíkové materiály mohou vykazovat vysokou anizotropii nebo naopak jsou zcela izotropní. Jsou známy materiály s minimální propustností pro plyny, zrovna tak vysoce porézní filtry, uhlíkové látky se sklovitě hladkým povrchem, nebo naopak s vysokou hodnotou měrného povrchu a schopností adsorbce. Využití progresivních uhlíkových materiálů v nejrůznějších oborech stále vzrůstá. Odhaduje se, že ve vyspělých státech připadá z celkové produkce průmyslového uhlíku již okolo 30 % právě na tyto materiály [1].

K progresivním uhlíkovým materiálům s nejrozšířenějším uplatněním patří pružný grafit, pyrolytický uhlík, skelný uhlík, uhlíková vlákna a kompozity uhlík — polymer a uhlík — uhlík.

#### PRUŽNÝ GRAFIT

Synonyma: Flexible graphite, sheet-like flexible graphite

Pružný grafit vzniká reakcí přírodního nebo vysoce orientovaného pyrolytického grafitu s oxidačními činidly a solemi a po tepelném zpracování je takto vzniklý expandovaný grafit lisován bez pojidel a plniv na pružné fólie.

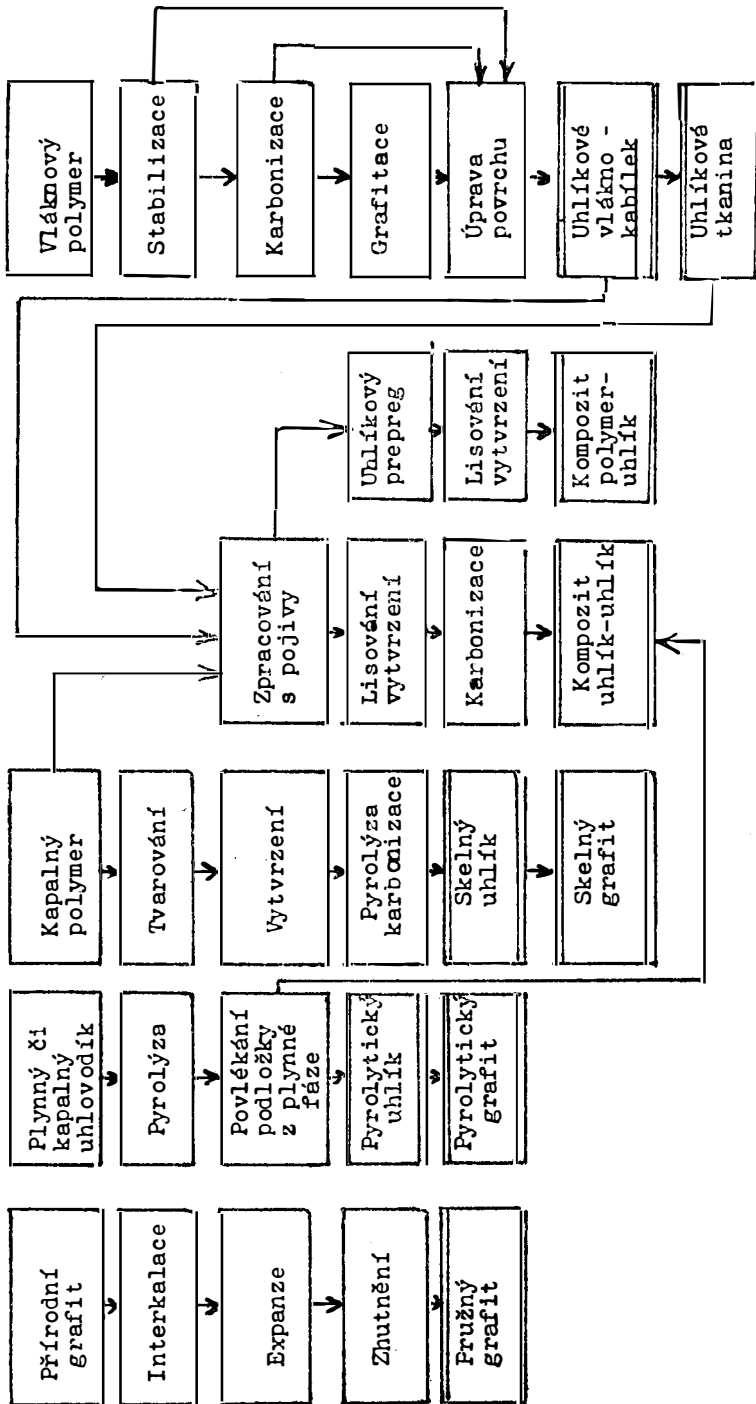
Pružný grafit je šedivý materiál s kovovým leskem, vždy vrstevnatý.

Jako výchozí materiál je používán přírodní grafit ve velikosti částic (vloček) až 2 mm, či vysoce orientovaný pyrolytický grafit (žíhaný na teplotu 2 800 °C) ve velikosti částic až 25 mm [2,3].

Postup přípravy pružného grafitu je možno tedy rozdělit do tří následujících operací (obr. 1):

- příprava interkalátových sloučenin vzniklých reakcí grafitu s oxidačními činidly,
- tepelný rozklad interkalátů grafitu za vzniku expandovaného grafitu,
- mechanické ztuhnutí expandovaného grafitu za vzniku konečného produktu.

Vzdálenost sousedních rovin a malá pevnost jejich vazby ve struktuře grafitu umožňuje působením oxidačních činidel vznik interkalátových sloučenin mezi



Obr. 1. Schéma přípravy progresivních uhlíkových materiálů.

Tabulka I  
Některé vlastnosti uhlíkových materiálů

Vlastnosti	Materiál	Průzný grafit II	Pyrolytický uhlík II	Skelný uhlík	Uhlíková vlákna	Kompozity uhlík—uhlík
Hustota ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )		0,9—1,1	1,7—2,2	1,4—1,5	1,6—2,0	1,4—1,65
Pórovitost (%)		$\rho = 1,5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	0	0	—	15—20
Pevnost v tlaku (MPa)		— 1 mm tl.	105	300—420	—	120—200
Pevnost v tahu (MPa)		$\delta$ 0,35 mm tl. $\rho = 1,0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	100	40—50	700—7 800	85—500
E-modul (GPa)		—	25	26—30	70—820	30—120
Pevnost v tahu za ohybu (MPa)		—	160	90—250	—	80—300
Souč. teplot. délk. roztažnosti $10^6 (\text{K}^{-1})$		3	0,9	25	—0,16 až 15	—0,5 až 7
Tepelná vodivost ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )		190	400	4—5	15—100	5—50
Měrný el. odpor $10^6 (\Omega \text{ m})$		10	5	6 000	4—17	20—80

těmito rovinami. Rychlým pulsním ohřátím dochází k mnohonásobnému explozivnímu roztavení interkalátu podél osy *c*. V závislosti na výchozí surovině se při teplotě cca 1 000 °C dosahuje expanze téměř 500krát a expandovaný grafit má sypanou hmotnost až  $2,3 \times 10^{-3}$  g . cm<sup>-3</sup>. Proto při lisování expandovaného grafitu je třeba počítat s vysokým lisovacím poměrem. Lisování se provádí nejčastěji na válcovacích stolicích. Požadované tvary pružného grafitu (zdánlivá hustota asi 1,5 g . cm<sup>-3</sup>) jsou pak z nekonečného pásu vytvářeny ražením. Vyšší hustoty vrstev pružného grafitu lze dosáhnout pomocí fenolické pryskyřice, která je před lisováním přimísena k expandovanému grafitu [2].

Vlivem vrstevnaté stavby vykazuje pružný grafit silnou anizotropii.

Nejdůležitější vlastnosti pružného grafitu jsou uvedeny v tabulce I.

V různých tvarech je pružný grafit používán pro těsnění pohyblivých i nepohyblivých se strojních součástí. Jako těsnící materiál v rozsahu —200 až 3 000 °C (do 500 °C univerzálně, do 3 000 °C v ochranné atmosféře) je bezúdržbový, nevyskytuje tvrdnutí, stárnutí a jeho životnost se pohybuje okolo 60 000 h [4]. Pružný grafit je použitelný do provozního tlaku 100 MPa. Z mechanických vlastností je pro funkci těsnění důležité zejména zpětné odpružení s tvarovou pamětí, které činí permanentně asi 10 % původní tloušťky [5].

Vzhledem ke své odolnosti vůči většině chemických činidel je pružný grafit používán jako těsnění armatur a vyložení různých chemických zařízení pro agresivní prostředí. Široké uplatnění nachází pružný grafit v chladicích systémech reaktorů i z hlediska zvýšení bezpečnosti provozu.

V tenkých foliích může být pružný grafit používán jako topný článek. Pružný grafit není smáčen tekutými kovy a proto se uplatňuje ve formě pomocného materiálu i pro vyložení odlévacích forem. Po pokrytí silně reflexními kovy (např. hliníkem, zlatem, stříbrem, mědí) se zvýší jeho odraznost a může být použit v kryogenních aplikacích, např. jako zásobník kapalného dusíku.

V ČSFR se dosud průmyslově nevyrábí. V zahraničí je vyráběn pod různými značkami, např. fa Union Carbide pod obchodním názvem Grafoil, fa Burgmann pod značkami Rotatherm, Statotherm, fa Sigrí pod značkou Sigraflex apod.

## PYROLYTICKÝ UHLÍK

Synonyma: Pyrolytic carbon, pyrocarbon, pyrolytic graphite

Pyrolytický uhlík je monolitický uhlíkový materiál získaný chemickým povlékáním podložky z těkavých uhlovodíkových sloučenin v teplotním rozsahu 727 až 1 827 °C [6].

Naproti tomu je pyrolytický grafit monolitický grafitový materiál s vysokým stupněm přednostní krystalové orientace *c* — os, kolmých k povrchu podložky, získaný grafitaací pyrolytického uhlíku nebo chemickým povlékáním z plynné fáze nad teplotou 1 827 °C [6].

Podle podmínek výroby je to materiál stříbřitě šedý, šedý až černý, vždy vrstevnatý.

Pro výrobu pyrolytického uhlíku (obr. 1) mají plynné uhlovodíky výhodu v jednodušším dávkování, ovšem tam, kde je nutná vysoká čistota se doporučuje použití vysoce čistých uhlovodíků kapalných. Jako výchozí látky se používají uhlovodíky metan až butan, etylen, acetylen, benzen, toluen i xyleny. Koncentrace resp. tlak použité uhlíkaté látky jsou závislé na druhu této látky, teplotě pyrolýzy, geometrii pracovního prostoru a způsobu ohřevu podložky. [7].

Při vakuovém způsobu povlákání se pracuje v rozsahu tlaků 80—2 000 Pa [8]. Teplota povlákání je určena účelem, pro jaký jsou vrstvy pyrolytického uhlíku vyráběny. Tenké vrstvy do tloušťky 20  $\mu\text{m}$  (např. elektrické odpory, ochranné a antiemisní vrstvy), které mají pevně lpět na podložce se vyrábějí do teploty cca 1 500 °C. Rychlosti růstu vrstvy jsou poměrně malé — asi 0,1  $\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$  [9]. Tlusté samonosné vrstvy (např. kelímky) o tloušťce až 20 mm se vyrábějí za teplot cca 2 000 °C. Zde je rychlost růstu vrstev přibližně 2  $\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$  [10]. Důležitost úpravy povrchu podložky je především zřejmá při přípravě samonosných snímatelných vrstev pyrolytického grafitu.

Vybrané vlastnosti pyrolytického uhlíku jsou uvedeny v tabulce I.

Pyrolytický grafit je prakticky nepropustný pro plyny. Vrstvy tlusté 1—2 mm zůstávají nepropustné do teploty 2 500 °C. Hodnoty tepelné vodivosti a měrného elektrického odporu v rovině *a*, *b* se výrazně liší od hodnot ve směru *c*. Zatím co elektrografit oxiduje již od teploty 500 °C, zvyšuje se u pyrolytického grafitu rychlost oxidace až nad teplotou 800 °C a hodnot oxidační rychlosti běžného elektrografitu dosahuje až při 1 500 °C.

Průmyslové aplikace začínají výrobou uhlíkových resistorů. Vysoká čistota, žárovzdornost a nízká propustnost pro plyny určují tento materiál pro ochranný povlak jaderných paliv [11]. Vzhledem k hodnotám mechanické pevnosti a tepelné vodivosti je pyrolytický grafit používán v raketové technice jako vystýlka raket a čelní krycí kužel [12, 13]. Ve vakuové technice je to vynikající materiál pro výrobu mřížek moderních výkonových vysílacích elektronek [14]. V metalurgii se uplatňuje jako materiál zvyšující tepelnou a korozní odolnost a snižující smáčivost elektrografitových kelímků a přípravků pro tavení a slinování [15]. Pro laboratorní praxi jsou pyrolytickým grafitem pokrývány za účelem snížení otevřené pórovitosti lodičky, kelímky, elektrody a kyvety pro atomovou absorpční spektroskopii [15, 16].

V ČSFR Tesla Blatná pyrolýzou benzenu nebo heptanu v rozsahu teplot 800—1 050 °C pokrývá keramické podložky jako elektrické odpory. Tesla Vakuová technika pokrývá molybdenové mřížky do vysílacích elektronek pyrolýzou butanu při teplotách 1 300—1 400 °C a vyrábí samonosné tlusté polotovary mřížek při teplotě asi 2 000 °C.

V zahraničí vyrábí průmyslově pyrolytický uhlík firmy Sigri Elektrographit GmbH, Schunk Kohlenstofftechnik GmbH, Ringsdorff — Werke GmbH, Xycarb B.V., Philips, Thomson — CSF, Union Carbide Corp., VEB Elektrokohle Lichtenberg a další.

## SKELNÝ UHLÍK

Synonyma: Glassy carbon, vitreous carbon, glass — like carbon

Skelný uhlík je monolitický negrafitující uhlík s velkou izotropií strukturních i fyzikálních vlastností, prakticky nepropustný pro kapaliny a plyny [6].

Vzniká karbonizací v tuhé fázi vybraných přírodních i syntetických polymerních látek. Je to černý, lesklý materiál připomínající hutností a charakterem lomu sklo. Moderní názory na strukturu skelného uhlíku hovoří o grafitových vrstvách, které nejsou pravidelně uspořádány, ale vzájemně propleteny — tzv. model „klubíčkové“ struktury [17, 18].

Výchozí látky pro výrobu skelného uhlíku by měly splňovat zejména dva základní požadavky [17]:

1. polymery musí vytvářet trojrozměrnou strukturní síť

2. karbonizace musí probíhat v tuhé fázi.

Dále je žádoucí, aby polymery vykazovaly co nejvyšší karbonizační zbytek, což znamená co nejnižší obsah nízkomolekulárních látek.

Skelný uhlík se v současné době vyrábí převážně ze syntetických pryskyřic (schéma na obr. 1). Polotovary jsou vytvářeny z kapalného polymeru nejčastěji litím, horkým, vstřikovacím nebo odstředivým litím či vstřikovacím lisováním [17].

Způsob tepelného zpracování polymerů je zejména určen tloušťkou výrobku, neboť nárůst teploty musí být řízen tak, aby odchodem štěpných produktů nenastalo porušení tvaru. Rychlost ohřevu se většinou pohybuje v jednotkách až desítkách stupňů Celsia za hodinu.

Karbonizace se provádí v rozmezí teplot 800—1 200 °C. Podle účelu použití následuje i další vysokoteplotní zpracování (až 3 000 °C).

Nejdůležitější vlastnosti skelného uhlíku jsou uvedeny v tab. I.

Skelný uhlík je mimořádně odolný proti běžným kyselinám, zásadám i taveninám, je málo smáčivý roztaveným hliníkem a kyslíkem je napadán až od 550 °C [1, 18].

Tento materiál se uplatňuje především ve formě kelímků, lodiček, reakčních nádob v chemických laboratořích (náhrada platiny, křemenného skla apod.), ve speciální metalurgii, polovodičové technice k výrobě částí jaderných reaktorů a stavebních prvků v jaderné technice. Při výrobě trub pro dopravu kapalin za teploty nad 130 °C slouží skelný uhlík jako ochranná antikorozní membrána přírub [19].

V lékařských aplikacích je vzhledem ke své kompatibilitě s lidskou tkání používán jako protéza středního ucha, náhrada zubních kořenů, hlavice čelistových kloubů a koncovka kardiostimulátorů [1, 17, 18, 19].

V ČSFR se skelný uhlík průmyslově nevyrábí. V zahraničí je vyráběn řadou firem pod různými obchodními názvy, např. LMSC — Glass-like-carbon firmou Lockheed Missiles and Space. Co., Vitro carbon firmou Nippon Carbon Co. a Sigradur firmou Sigri Elektrographit GmbH apod.

## UHLÍKOVÁ VLÁKNA

Synonyma: Carbon fibres, graphite fibres

Uhlíková vlákna jsou tvořena negrafitujícím uhlíkem, získaným karbonizací buď organických syntetických nebo přírodních vláken, nebo tažením z organických prekurzorů jako jsou pryskyřice nebo smoly. Vlákna mohou být případně dále tepelně zpracována až na teplotu 3 000 °C (obr. 1) [6].

Základem struktury uhlíkových vláken je monoatomová vrstva uhlíkových atomů v sestavu  $sp^2$ , která má tvar pruhu. Pruhy se skládají do mikrofibril, přičemž toto skládání se projevuje jako turbostratická neuspořádanost. Mikrofibrily jsou mírně zvlněny a jsou orientovány přibližně s osou vláken. Vlákna jsou tvořena spojením mikrofibril. Prostor mezi mikrofibrilami není beze zbytku vyplněn. Ve struktuře vláken tak vznikají jehlovité póry, které jsou orientovány s jistou distribucí kolem osy vlákna [20, 21].

Uhlíková vlákna jsou vyráběna průmyslově ze tří typů surovin.

Původní americké postupy vycházely z vláken viskóзовých. Nízká výtěžnost

a poměrně složitý proces k dosažení vyšších parametrů způsobily, že využití této suroviny je na ústupu [22].

Japonské a britské práce použily jako výchozí surovinu vlákna polyakrylonitrilová (PAN). Pro výrobu C-vláken s vyššími parametry byly vyvinuty speciální typy PAN vláken, lišících se od textilních PAN vláken jemností, stejnoměrností, dokonalostí chemického složení i vyšším stupněm orientace struktury. V současné době je přibližně 90 % uhlíkových vláken připravovaných z této suroviny.

Třetím typem výchozího materiálu jsou smoly po destilaci ropy nebo černo-uhelného dehtu. Poměrně levná surovina se však obtížně zvláknuje, dává sice dobrý hmotový výtěžek, ale pro vysoké hodnoty mechanické pevnosti vyžaduje speciální úpravy [23].

Výrobní postup při využití všech uvedených surovin má tři základní fáze. Nejprve jsou výchozí vlákna tepelně stabilizována. Původně lineární polymery se při této operaci spojují v plošné útvary a vytvářejí základ budoucí struktury. Vlákna jsou podrobena účinkům oxidačních nebo dehydratačních činidel při teplotách 200—400 °C a stávají se nehořlavými a netavitelnými. Vlastní proces probíhá ve skutečnosti velmi složitě a je časově nejnáročnější částí přípravy uhlíkových vláken, trvá řádově jednotky až desítky hodin.

Druhou fází procesu tvoří tzv. karbonizace, při níž se za teplot 800—1 900 °C uvolňují zplodiny obsahující vodík, kyslík a dusík ve formě sloučenin s uhlíkem. Operace je prováděna ve velmi čistém inertním prostředí a výsledná vlákna obsahují 92—99 % uhlíku.

Třetí fáze představuje dokončovací úpravy, zahrnující např. grafitaci při 2 500—3 000 °C, oxidační povrchovou úpravu a nanášení ochranných povrchových vrstev tzv. sizing. Takto upravená vlákna mají své základní vlastnosti, které se již v průběhu zpracování do kompozitů prakticky nemění [24].

Široký rozsah některých vlastností uvedených v tabulce ukazuje na velké množství variací uhlíkových vláken podle podmínek přípravy (tab. I). V podstatě jsou však vyráběny pouze tři skupiny nebo typy vláken.

Nízkomodulová vlákna — nejlevnější typ uhlíkových vláken, jsou připravována z izotropních smol a pyrolyzních olejů a jejich hlavní použití je pro tepelné izolace a těsnění. Modul pružnosti vláken je cca 70 GPa a pevnost v tahu okolo 700 MPa.

Speciální variantou těchto vláken jsou tzv. sorpční uhlíková vlákna vyráběná většinou z viskózy. Jejich měrný povrch je asi 400—2 000 m<sup>2</sup> · g<sup>-1</sup>. Jsou využívána zejména ve zdravotnictví, při ekologických zásazích a v chemii, neboť vykazují velké sorpční schopnosti. Regenerace jejich povrchu se provádí ohřevem nad 200 °C.

Vysokomodulová vlákna (označovaná jako vlákna I. typu nebo HM vlákna) se vyrábějí z PAN a mezofázových smol. Použití mají především v kosmonautice a speciálních průmyslových oblastech. Modul pružnosti těchto vláken se pohybuje od 300 do 800 GPa, pevnosti od 1 800 do 3 000 MPa.

Vysoce pevná vlákna vyráběná z PAN (označená též jako vlákna II. typu nebo HT, HS) mají nejširší použití v leteckých, průmyslových i spotřebních výrobcích. V minulých letech prošla rychlým vývojem parametrů — původní pevnosti byly 3,0 GPa, současná nová generace C-vláken někdy označovaná jako vlákna vysoce tažná. Tato vlákna mají pevnosti 4,0 až 7,0 GPa při modulu pružnosti 200 až 300 GPa [25].

Průměr vyráběných uhlíkových vláken od 5 do 13 μm je natolik malý, že základní formou sortimentu je kontinuální pramenec (kablík) uspořádaných

jednotlivých vláken (monofilů) v počtu 1 000 až 40 000. Nejběžnější pramence mají 3 000, 6 000 nebo 12 000 monofilů.

Další formou jsou tzv. krátká vlákna v délkách do 1 m nebo sekaná vlákna v délkách od 0,25 do 6,25 mm.

V ČSFR jsou uhlíková vlákna vyráběna v současnosti na poloprovozních jednotkách — vysokopevnostní z PAN v Monokrystalech Turnov a nízkomodulová z pyrolyzních olejů v VÚCHV Svit.

Špičkovými světovými výrobci jsou Toray Inc., Toho Beslon a Kureha (Japonsko), Hysol-Grafil (Velká Británie) a Hercules Inc. (USA).

Textilní zpracování je náročné pro vysokou tuhost a nízkou tažnost vláken, přesto v současné době špičkové světové firmy nabízejí 10—15 % své produkce ve formě tkanin ať již čistě uhlíkových nebo v kombinaci s vlákny skleněnými nebo aramidovými. Jako polotovary s pojivem je nabízen prepreg (předimpregnovaný polotovar) s jednosměrnou výztuží a cca 40 % pojiva v nelepivém stavu. Základní škála pojiv obsahuje systémy epoxidových a polyimidových pryskyřic, nejnověji jsou vyráběny prepregy s termoplastickým polyetheretherketonem.

Uhlíková vlákna jsou převážně využívána pro přípravu konstrukčních kompozitních materiálů s polymerní maticí — carbon fibre — reinforced polymer (CFRP).

Technologie zpracování uhlíkových vláken do konstrukčních prvků využívá tažení profilů (pultruze) nebo navíjení. Zpracování prepregů může být ruční nebo strojové při použití forem pro lisování, jader pro navíjení a podobně. Vytvrzování prepregových součástek vyžaduje zvýšenou teplotu a tlak v určitém režimu. Využívány jsou autoklávy, vyhřívané lisy, vyhřívané tlakové přípravky, vakuové přípravky, vypalovací pece, sušárny apod. Termoplasty s nahodile orientovanými sekanými uhlíkovými vlákny jsou zpracovávány lisováním, lisostříkem a podobnými technologiemi [26].

Polymerní kompozity s uhlíkovými vlákny se vyznačují výjimečně vysokou mechanickou tuhostí, vysokou mechanickou pevností, vysokou odolností vůči únavě, velmi nízkou teplotní roztažností, pseudoplasticitou a anizotropií vlastností.

Polymerní kompozity s uhlíkovými vlákny byly nejprve použity jako konstrukční prvky v letectví a kosmonautice. Následovaly aplikace ve strojírenství, kde byly konstruovány rychle rotující části odstředivek, turbín, dmychadel, kompresorů, paže robotů, manipulátorů apod. [26].

Ve zdravotnické technice je využívána snášelnost s lidskou tkání. Byla zkoušena samotná uhlíková vlákna jako implantáty šlach a kompozity jsou ověřovány v kloubní a kostní protetice [27, 28, 29].

Na světě se v současné době zabývá výrobou uhlíkových kompozitů s polymerní maticí mnoho set firem.

V ČSFR mají největší zkušenosti se zpracováním uhlíkových vláken Výzkumný zkušební letecký ústav v Praze, Státní výzkumný ústav materiálů v Praze a Výzkumný ústav gumárenské a plastikářské technologie ve Zlíně. Teoretické problémy při výrobě i aplikacích kompozitů uhlík—polymer jsou řešeny na akademických pracovištích jako např. v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky, v Ústavu termomechaniky a v Ústavu makromolekulární chemie v Praze.



## KOMPOZITY UHLÍK—UHLÍK

Synonyma: Carbon — carbon composites, carbon fibre-reinforced carbon (CFRC), (CFC)

Kompozity uhlík—uhlík jsou monolitické uhlíkové materiály sestávající z uhlíkových vláken, převážně ve formě vícesměrové tkaniny uložené v uhlíkové matrici.

Druh vláken, jejich chemická úprava, orientace a množství v kompozitu, druh výchozího polymerního materiálu (matrice) a tepelné zpracování určují výsledné vlastnosti kompozitu [30].

Pro přípravu kompozitů jsou používána převážně uhlíková vlákna vyrobená karbonizací nebo grafitací z PAN (polyakrylonitril) a to buď ve formě pramenců příze nebo tkanin. Jako matrice jsou nejčastěji používány fenolické a furfurylalkoholové pryskyřice (reaktoplasty) nebo smoly [31, 32, 33].

Výroba kompozitů C—C spočívá v přípravě předimpregnovaného polotovaru (prepreg), který je posléze buď složen do několika vrstev v plošném tvaru nebo stočen do válce. Tyto tvary jsou dále vylišovány a vytvrzeny a následně karbonizovány v ochranné atmosféře na teplotu 1 000 °C. Za účelem snížení pórovitosti je impregnace a karbonizace vícekrát opakována [31] (obr. 1). Některé druhy kompozitů jsou dále grafitovány na teplotu 2 500 °C.

Vedle kapalné impregnace je často používána i plynná impregnace, kdy matrice je tvořena pyrolytickým uhlíkem [30, 31, 34, 35, 36].

Velkým problémem při výrobě kompozitů C—C je porušení adheze mezi vlákny a matricí, které nastává při karbonizaci (grafitaci) „zeleného“ polotovaru. V současné době řada výzkumných pracovišť navrhuje různé úpravy povrchu uhlíkových vláken za účelem zvýšení kompatibility s matricí [37].

Některé vlastnosti kompozitů C—C jsou uvedeny v tab. I.

Tyto materiály vykazují především vysoké hodnoty mechanické pevnosti až do teploty 2 500 °C (v ochranné atmosféře) a pseudoplastické chování. Nízké hodnotě teplotní roztažnosti odpovídá i vysoká odolnost proti náhlým změnám teploty (tab. I).

Kompozity jsou dále odolné proti korozi neoxidickými kyselinami, louhy, solemi a organickými rozpouštědly. Jsou zcela kompatibilní s lidskou tkání a krví.

Všechny tyto vlastnosti je předurčují jako materiály vhodné pro použití v raketové technice (trysky), v letectví (náběhové hrany křídel, brzdové kotouče nadzvukových letadel) a jako konstrukční prvky vysokoteplotních zařízení (ochranné trubky vakuových pecí) [31].

Snášenlivost s lidskou krví a tkání dovoluje použít kompozity při konstrukcích umělého srdce a přípravě umělých kyčelních kloubů [31].

Připravou kompozitů C—C se zabývají převážně firmy, které vyrábějí uhlíková vlákna jako například Sigri, která vyrábí kompozity C—C pod značkou CC 1001 až CC 2002.

V ČSFR nejsou kompozity uhlík—uhlík průmyslově vyráběny.

## ZÁVĚR

Vývoj progresivních uhlíkových materiálů končí zcela přirozeně kompozity uhlík—uhlík, jejichž vlastnosti jsou jakousi umocněnou syntézou vlastností téměř všech dříve uvedených materiálů.

Uhlíkové kompozity je možno vytvářet v různých tvarech dle použití, tedy

„šit na míru“. Vzhledem k malé teplotní roztažnosti a vysoké tepelné vodivosti odolávají za stálého tvaru náhlým změnám teploty. Při své nízké hmotnosti vykazují vysoké hodnoty mechanických pevností a při porušení se chovají pseudo-plasticky.

Mají také vynikající korozní odolnost proti většině chemikálií a jsou kompatibilní s lidskou krví i tkání. Jsou ve vakuu či v inertní atmosféře stabilní až do teploty asi 2 200 °C.

Prakticky jedinou nevýhodou kompozitů uhlík—uhlík je jejich oxidace asi od teploty 600 °C. Řada vědeckých i průmyslových pracovišť řeší však i odstranění této nevýhody pomocí žárovzdorných pokryvů např. siliciumkarbidem.

#### Literatura

- [1] Findeisen B.: Freiburger Forschungshefte A 687, 148 (1984).
- [2] US patent 3 404 061 (1968).
- [3] Vohler O., Ernst H., Hohegger G.: V. I. E. VIII, 1, (1972).
- [4] Prospekt Burgmann 1984.
- [5] Prospekt Sigrí 1984.
- [6] The International Committee for Characterization and Terminology of Carbon: Carbon 5, 445 (1982).
- [7] Knippenberg, W. F., a kol.: Philips Techn. Rev. 28, 231 (1967).
- [8] Balík K.: Kandidátská disertační práce, 1987.
- [9] Schneider P., Balík K.: Tesla electronics 3, 85 (1979).
- [10] Balík K.: Tesla electronics 3, 87 (1980).
- [11] Vohler, K.: Carbon 6, 397 (1968).
- [12] Parmee A. C., Proc. of the 10th Conf. on Carbon, 378, Penn. USA 1971.
- [13] Bakalarski I., Pierechod Z.: Mechanik 7, 375 (1984).
- [14] Prospekt Thomson CSF, 1974.
- [15] Šeří P.: Sborník 2. Čs. konf. o uhlíku, 217, Topoľčany, 1975.
- [16] Medzanská H., Hodál E.: Sborník Celostátní konference, 141, Topoľčany, 1979.
- [17] Dübgen R., Popp G.: Z. f. Werkstofftechnik 15, 331 (1984).
- [18] Fitzer E., Schäfer W., Yamada S.: Carbon 7, 643 (1969).
- [19] Petrova O. M., Komorova T. V., Fedosejev C. D.: Plaszt. Massy 8, 20 (1982).
- [20] Baldrián J., Pleštil J.: Zpráva V MCH ČSAV, 1974.
- [21] Diefendorf R. J.: ASML — Technical Report 72—133, I, II, 1973.
- [22] Japan patent 36 — 13113 (Union Carbide Corporation).
- [23] Daumt G. P.: Carbon 5, 759 (1989).
- [24] Ishikawa T., Nagaki T.: Recent Carbon Technology JEC, Press. Inc. 1983.
- [25] Fitzer E.: Carbon 5, 621 (1989).
- [26] Fitzer E.: Carbon Fibres and their Composites, Springer-Verlag Berlin 1985.
- [27] Lapatto C. I.: Sov. problemy biomechaniky 5, C, 105 (1988).
- [28] Burri C., Helbing G.: 4th Int. Carbon Conf. Baden-Baden, 676 (1986).
- [29] Hüttner W.: Biomaterialien und Nahtmaterial, 77, Springer-Verlag Berlin—Heidelberg 1984.
- [30] Agarwal B. D., Broutman L. J.: Vláknové kompozity, SNTL Praha 1987.
- [31] Fitzer E.: Carbon 2, 163 (1987).
- [32] US Patent 4 554 024 (1986).
- [33] Chang T., Okura A.: Transactions ISIJ, 27, 229 (1987).
- [34] Marínkovič S., Dimitrijevič S.: Carbon 6, 691 (1985).
- [35] Kojima A. a kol.: Carbon 1, 47 (1984).
- [36] Oh S. M., Lee J. Y.: Carbon 6, 763 (1988).
- [37] Fitzer E., Weiss R.: Carbon 4, 455 (1987).