

# UHLÍKOVÉ KOMPOZITY V KONSTRUKCI VZDUCHOLODÍ

## Graphite Composites used in the Airship Design

Petr Mareček

*Abstract:* The question number one in the airship design is the weight of entire parts of the airship. To increase load capacity of the airship is necessary to minimize weight of parts and still keep sufficient safety factor and functionality. Composites materials based on carbon fibers are characterized by high strength, stiffness and low weight. Lamination technology destined for single-part or small-lot production allows produce almost any shape that cannot be produce by classic methods like machining or bending sheets. Carbon fibers can be combined with other composite or metallic materials thereby markedly lighten construction, because you can eliminate connection via screws or rivets.

*Key words:* Carbon fiber, Lamination, Composite, Airship, Gondola.

### 1. Vlastnosti uhlíkových vláknových kompozitů

Vláknové kompozity jsou tvořeny maticí nejběžněji polymerní vyztuženou vlákny s vysokou pevností či vysokým modulem pružnosti. Jelikož charakteristické hodnoty pevnosti a tuhosti se projevují jen ve směru vláken, jsou vlastnosti výsledného kompozitu ovlivněny orientací vláken v něm. Při výrobě kompozitních dílů se vlákna kladou ve vrstvách v různých směrech lze tak dosáhnout plošně izotropního materiálu. Na druhou stranu lze orthotropie vláken využít pro upřednostnění některého směru, ve kterém je součást značně namáhána.

Nejběžnější používaná vlákna pro výrobu kompozitů jsou skleněná, aramidová, borová a uhlíková. Pro speciální účely existuje celá řada vláken kovových (W, Be), přírodní (bavlna, hedvábí, len), minerální (křemenná skla). Vlastnosti nejrozšířenějších vláken jsou zobrazeny v *tabulce 1* v porovnání s klasickými konstrukčními materiály. Mechanické vlastnosti se pro účely srovnání kompozitů s klasickými materiály většinou uvádějí v měrných veličinách tedy vztažených na hustotu. Vzhledem k rozsahu článku zde uvádím pouze absolutní veličiny. Z tabulky je patrné, že uhlíkové kompozity z hlediska mechanických veličin převyšují hliníkové slitiny a v měrných jednotkách převyšují i vlastnosti ocelí.

Důležitou vlastností uhlíkových vláken je nízká teplotní roztažnost, dokonce v rozsahu teplot 0÷250 °C je součinitel teplotní roztažnosti záporný  $\alpha = -1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . V kombinaci s epoxidovou maticí je pak teplotní roztažnost  $\alpha = 1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Epoxidová pryskyřice má nejlepší přilnavost (smáčivost) s uhlíkovými vlákny. Uhlíková vlákna jsou chemicky a tepelně

odolná. U kompozitů je teplotní odolnost dána maticí většinou do 160°C. Dobře tlumí vibrace.

**Tab. 1**

Materiál	Hustota $\rho$ [kg·dm <sup>-3</sup> ]	Mez pevnosti v tahu $R_m$ [MPa]	Modul pružnosti v tahu $E$ [GPa]
Sklo typ E	2,54	3500	72
Uhlík	1,90	2500	240
Bór	2,63	2800	210
Aramid (Kevlar 29)	1,44	3620	59
Dřevo	0,2÷0,8	100	10
Plasty	0,9÷1,8	100	2
Slitiny hliníku	2,76	100÷600	76
Ocel	7,85	340÷2100	210

## 2. Technologie výroby – laminování

Výrobní proces laminovaných kompozitních dílů se skládá ze tří hlavních částí – výroba formy, pokládání a sycení tkaniny maticí, vytvrzení. Výroba formy je časově nejnáročnější a mnohdy i technologicky složitá. V kusovém či malosériovém měřítku se lze setkat s formami z polystyrenu, dřeva či umělého dřeva. Nejrychlejší na výrobu a nejméně nákladné je řezání polystyrénových bloků odporovým drátem a jejich složení do výsledné podoby formy. Polystyrénové formy málokdy vydrží více jak jedno či dvě zaformování. Pro více kusů se vyplácí forma dřevěná, kde je tvar většinou frézován na NC strojích. Dřevěná forma oproti polystyrénové je tužší a lépe leštitelná. Další moderní možností výroby formy je využít technologie rapid-prototype. Při návrhu formy je nutné počítat s rozměrovým přírůstkem na separační a ochranné vrstvy. Čistá hladká forma je několikrát lakována a opatřena separačním nátěrem (vosk, silikon, speciální pryskyřice), aby se po vytvrzení laminát nepřilepil k formě a bylo jej možné jednoduše vyjmout.

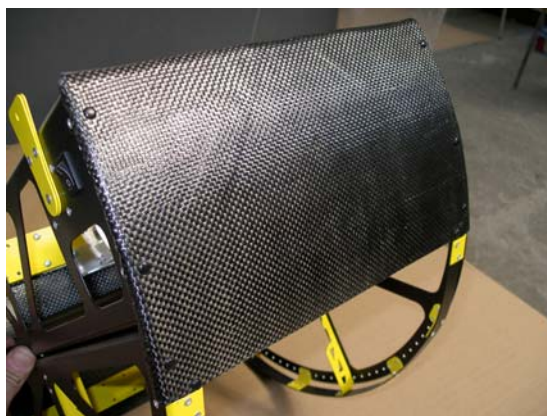
Pokládání tkaniny je provázáno sycením pryskyřicí nejčastěji epoxidovou. Na trhu existují stovky druhů pryskyřic jejichž parametry jsou viskozita, doba zpracovatelnosti, doba tuhnutí (za pokojových teplot či v peci), teplotní odolnost, hustota, chemická odolnost, biokompatibilita a další. O něco snazší je výběr výztuží ve formě tkaniny, pásek či rovingu. Volba materiálu závisí na požadovaných mechanických vlastnostech viz. *tabulka 1* a technologii zpracování. Samotná laminace probíhá pokládání jednotlivých vrstev s požadovanou orientací vláken střídáná prosycováním pryskyřicí. Uhlíková vlákna během vytvrzování do sebe nasáknou až 50% pryskyřice, prosycení tedy musí být dostatečné, aby nedocházelo k oddělení jednotlivých vrstev od sebe nebo vzniku děr. Po prosycení poslední vrstvy se celá plocha pečlivě stlačí – válečkováním nebo přiložením druhého dílu formy a zatížením. Další možností je vakuování resp. potažení povrchu fólií, která je po obvodu formy utěsněna a přes uzavíratelný ventil vysát veškerý vzduch. Podtlak je třeba udržovat alespoň polovinu doby vytvrzování.

Vytvrzení probíhá buď za pokojových teplot nebo za zvýšených teplot dle volby použité matrice. Doba vytvrzení i zpracování je závislá na použitém tvrdidlu a je volitelná v širokém rozsahu časů. Po vytvrzení již zbývá jen vyjmutí z formy, očištění a případné přebroušení a povrchová úprava.

### 3. Konstrukční kompozitní prvky na vzducholodi

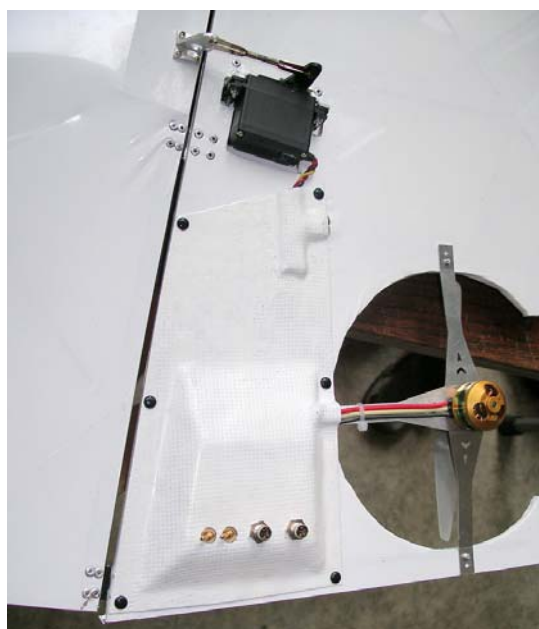
Z předchozích kapitol jasně vyplývá, že použití uhlíkových dílů přináší sebou značnou úsporu hmotnosti při zachování mechanické tuhosti, možnost výroby spojitých hladkých ploch, vzhledově atraktivní povrchy součástí, a to při relativně nenáročném výrobním procesu. Ukázky již realizovaných komponent pro vzducholod' jsou zobrazeny a popsány níže. Veškeré zmíněné díly jsou vlastní výroby.

**Kryty a přepážky oddělené gondoly obr. 1** nesoucí řídicí elektroniku, navigační jednotku, IR a vizuální kameru jsou laminovány na jednostrannou pozitivní formu ze tří vrstev uhlíkové tkaniny prosycené epoxidovou pryskyřicí. Tloušťka stěny uhlíkové přepážky/krytu je 0,8 mm. V prvních verzích našich gondol jsme používali přepážky z 1 mm tlusté překližky. V tomto případě jsou obě varianty hmotnostně rovnocenné. Významným přínosem použití krytů z uhlíku spočívá v možnosti vytvoření záhybů kolem hran a tím zpevnění celé plochy. Díky tomu se nosná konstrukce z duralového plechu obejde bez přidavných přepážek, které celou gondolu vyztužovali a je celkově odlehčena o 300 g. V tomto případě byl uhlíkový laminát volen zejména pro jeho jednoduché tvarování a estetický dojem.



**Obr. 1** Čelní kryt gondoly pro devítimetrovou vzducholod'. Rám je tvořen z duralových ohýbaných plechů snýtovaných k sobě (černý a žlutý lak). V přední a zadní části jsou použity uhlíkové díly.

**Kryt kabeláže a regulátorů směrovky obr. 2** opět využívá možnosti lehkého tvarování uhlíku. Díky tloušťce křídla tvořeného 5 mm silnými smrkovými profily potaženými nažehlovací fólií, je problematické do tak malých rozměrů vměstnat jakékoliv konektory, regulátory či kabely. Vytvarováním uhlíkového krytu je získáno potřebné místo pro uložení regulátorů pro pomocné motory směrovky, kabeláže propojující motory přes regulátory ke konektorům a samotné konektory. Celý kryt je uchycen k tělu směrovky snímatelnými plastovými nýty, aby bylo možné v případě poruchy snadno kryt demontovat. Kryt je vyroben jen ze dvou vrstev uhlíkové tkaniny laminované do pozitivně-negativní formy. Díky oboustrannému zaformování a následném zatížení je tloušťka krytu konstantní 0,5 mm a bez vzduchových mezer, které mohou vzniknout při nesprávném přilnutí jednotlivých vrstev tkaniny.



**Obr. 2** Kryt směrovky je osazen dvěma konektory s ochranou IP67 a dvěma zlatými konektory pro napájení pomocných motorů směrovky. Celý kryt je nalakován ve shodné barvě se směrovkou.

**Aerodynamicky profilovaný kryt** měřící planžety slouží k zakrytí tenzometrů nalepených na planžetě v zařízení pro měření charakteristik vrtulových pohonů. Jelikož celý uhlíkový nosník (nyní ve vývoji) ukotvený přes měřící planžetu k rámu zařízení je obtékán proudícím vzduchem za vrtulí, je nutné, aby měl co nejmenší součinitel odporu a ovlivňoval tak proudění co nejméně. Stejný tvar jako nosník má i kryt planžety viz. obr. 3, který chrání tenzometry zapojené do můstků před teplotním ovlivňováním proudícím vzduchem. Kryt je laminován do oboustranné formy ve dvou vrstvách s tím, že se směry vláken střídají po 45°.



**Obr. 3** Tvar krytu odpovídá symetrickému profilu NACA 0024. Na odtokové hraně je rozříznut, aby jej bylo možné nasadit na měřící planžetu.

Tloušťka profilu je 0,5 mm a hmotnost při rozměrech 100×100×20 mm 5 gramů.

Dalšími, v této době navrhovanými, díly z uhlíkového laminátu jsou již zmíněný aerodynamický nosník, jehož mechanické vlastnosti jsou srovnatelné s duralovou tyčí Ø 40 mm a hmotnost 2x menší. Pro novou pohonnou gondolu devítimetrové vzducholodě je

navrhována kompozitní otočná hřídel nesoucí hlavní motory. Opět se jedná o aerodynamicky profilovaný nosník s optimalizovanou tuhostí ve směru působení tahu motorů. Oproti stávajícímu řešení, kdy je použita duralová trubka, nové řešení umožňuje veškerou kabeláž, regulátory a elektroniku pohodlně schovat dovnitř profilu a tím ji uchránit před okolními vlivy.

## References

- [1] Dresselhaus, M.S.; Dresselhaus, G. et al. *Graphite Fibers and Filaments*. Springer Series in Materials Science 5. Springer Verlag, 1988. 382 s. ISBN 3-540-18938-6.
- [2] Machek, V.; Sodomka J. *Polymery a kompozity s polymerní matricí*. Praha: ČVUT, 2008. 85 s. ISBN 978-80-01-03937-4.
- [3] Legendre, A. *Uhlíkové materiály : od černé keramiky k uhlíkovým vláknům*. Informatorium. Praha, 2001. 173 s.
- [4] HEXCEL, *Prepreg Technology*, dostupné na [www.hexcel.com](http://www.hexcel.com), 32 s.