

Technologie výroby leteckých dílů z kompozitu na bázi uhlíkové vlákno a termoplastická matrice

Ing. Josef Křena

Abstrakt: Přednáška pojednává o použití kompozitu uhlík/polyfenylsulfid (PPS) pro výrobu dílů v letectví. Obsahem jsou informace o vlastních složkách kompozitu i o vlastnostech složeného materiálu. Pozornost je věnována zejména termoplastové matici a rozdílům, které oproti termosetovým kompozitům přináší. To se promítá do technologie s využitím polotovarů různých typů, materiálových vlastností i způsobů spojování. Představuje se také několik konkrétních aplikací zahraniční i vlastní produkce.

Materiálové složky

Kompozity s polymerní maticí se používají běžně v širokém rozsahu aplikací. Jedná se však v naprosté většině o matici z termosetu. Teprve v posledním desetiletí se intenzivně rozšířilo použití termoplastové matrice do náročnějších dílů. Umožnil to pokrok ve vývoji plastů vhodného typu.

Používané výztuže

Pro tento typ kompozitu je možné používat obvyklé typy uhlíkových i skleněných vláken ve formě tkanin i jednosměrného uložení při obvyklém poměru jejich podílu v kompozitu. To zaručuje, že základní parametry kompozitu jako jsou modul pružnosti a pevnost v tahu budou mít podobné hodnoty jako u kompozitu s maticí termosetickou.

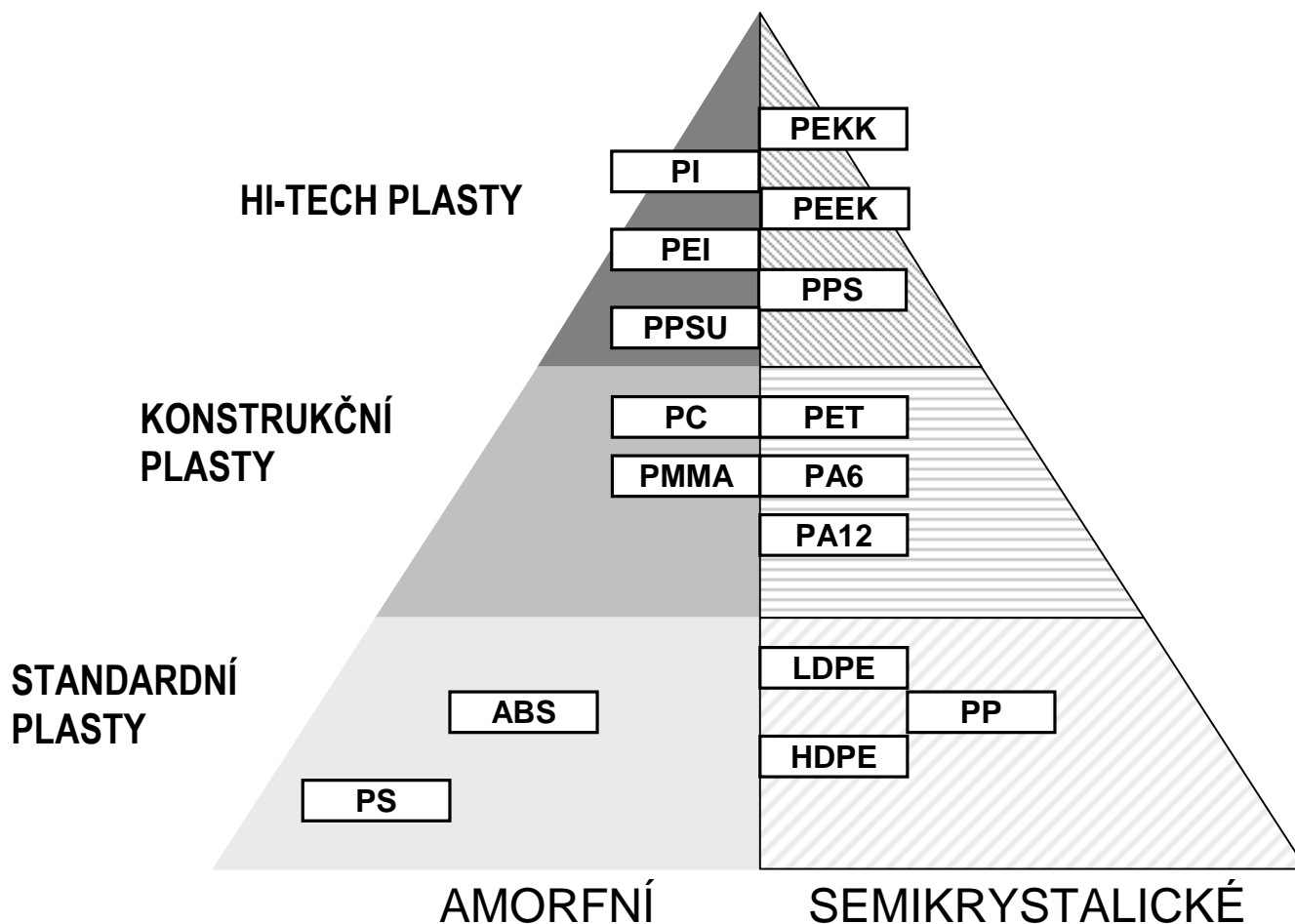
Používané matrice

Prvním termoplastem s vyššími termomechanickými charakteristikami, který začal být používán jako matrice je PEEK. To bylo v 80tých letech, kdy se hledala náhrada za termosetová pojiva s tehdy velmi nízkou rázovou odolností. Technologie zpracování PEEK je však velmi obtížná a materiál je relativně drahý. Určité aplikace byly v té době pouze na vojenských letounech.

V roce 1989 se začal používat Polyeterimid (PEI). Jeho výhodou jsou výborné mechanické vlastnosti a nehořlavost, ale nevýhoda je v nižší chemické odolnosti.

Dalším termoplastem, který se začal používat v roce 1997 byl Polyfenylsulfid (PPS) vyznačující se dobrou zpracovatelností.

Nejnovějším materiálem používaným od roku 2003 je Polyeterketonketon (PEKK). Ten přináší výborné termomechanické charakteristiky při dobré zpracovatelnosti.



Obrázek 1. Třídění termoplastů

Typ pojiva	Značení	Teplota skelného přechodu	Teplota tavení	Teplota zpracování	Typ morfologie
		°C	°C	°C	
Polypropylen	PP	-4	170	191-224	Semikrystalický
Plexi	PMMA	100	--	199-246	Amorfní
Polyamid	PA6	60	216	246-274	Semikrystalický
Polyamid	PA12	46	178	200-240	Semikrystalický
Polyfenylsulfid	PPS	88	285	329-343	Semikrystalický
Polyeterimid	PEI	218	--	316-360	Amorfní
Polyetereterketon	PEEK	143	345	382-399	Semikrystalický
Polyeterketonketon	PEKK	156	310	327-360	Semikrystalický

Tabulka 1. Teplotní vlastnosti vybraných termoplastů

Kvalitativně se termoplasty dělí na amorfnní a semikrystalické (viz obrázek 1). Jejich chování při zvyšování teploty je velmi rozdílné. Semikrystalický termoplast (např. PPS) má stav s nejnižší energií, pokud je v semikrystalickém stavu. Takový stav je vždy směsí krystalické a amorfnní fáze. Pokud je výchozí stav PPS amorfnní, tak při ohřevu měkne již při cca 90°C, ale již při 120°C se rozbíhá krystalizace, která nastoluje velmi mechanicky stabilní stav, který se udržuje až do teploty tavení, které počíná od teploty 250°C. Při teplotě 300°C je již plast zcela roztavený. Při následném ochlazování materiál postupně tuhne s náhodnou strukturou, která se pak od určité teploty začíná organizovat do krystalů. To však závisí na rychlosti ochlazování. Při vysoké rychlosti se krystalizace nestačí rozvinout a materiál zůstává amorfnní. Pro konstrukci je samozřejmě vhodný stav semikrystalický.

Mezi jednotlivými pojivy jsou i jiné než teplotní rozdíly. Ty ovlivňují volbu daného typu pro určitou aplikaci. Podle toho, zda se bude jednat o díl do interiéru nebo do draku, zda bude v sestavě, která se nýtuje, lepí nebo svařuje se musí volit vhodný materiál. Základní orientaci přináší následující tabulka.

Typ pojiva	Rázová odolnost	Chemická odolnost	Samozhášivost	Poznámka
PA12	velmi dobrá	dobrá	slabá	snadno se lepí a lakuje
PPS	dobrá	výborná	výborná	výskyt mikrotrhlin, svařitelný
PEI	velmi dobrá	velmi dobrá	výborná	snadno se lepí, nízká odolnost k horké hydraulické kapalině
PEEK	výborná	výborná	velmi dobrá	výborné tribologické vlastnosti

Tabulka 2. Porovnání užitečných vlastností termoplastových matic

Porovnání termosetů a termoplastů

Obecně se dá říci, že termoplastové matrice přinesly kompozitům významně vyšší rázovou odolnost. Termosetové matrice však v posledních letech zvyšují svoji houževnatost a tento rozdíl není již tak velký. Navíc si termosety udržují určitý náskok ve vyšší mezi únavy.

Další rozdíly mezi termoplasty jsou v jejich užitečných vlastnostech. Následující přehled porovnává oba typy materiálů z mnoha různých hledisek.

TERMOSETY

- výroba dílu je nevratný chemický proces
- skladování polotovarů vyžaduje mrazicí box
- zavedená technologie
- relativně křehký materiál
- pevnost v tlaku je výborná
- únavová životnost je výborná
- damage tolerance je dobrá
- dielektrické vlastnosti jsou dobré
- absorbuje vodu až 2%
- FST parametry jsou dobré
- teplota zpracování 120-200 °C
- doba vytvrzování je dlouhá
- tlak pro zpracování je do 0,7 MPa
- fixace vrstev při skladbě po sekvencích
- skladba v čisté místnosti
- spojování lepením nebo mechanickými spoji

TERMOPLASTY

- opakovatelný výrobní proces
- neomezený čas skladování za normálních podmínek
- nová netradiční technologie
- houževnatý materiál
- pevnost v tlaku je dobrá
- únavová životnost je dobrá
- damage tolerance je výborná
- výborné dielektrické vlastnosti
- absorbuje vodu jen do 0,1%
- výborné FST vlastnosti
- teplota zpracování je 320-420°C
- velmi krátká doba zpracování
- tlak pro zpracování je do 2 MPa
- fixace každé vrstvy při skladbě
- skladba v normálních podmínkách
- spojování lepením, mechanickými spoji a svařováním

Mechanické vlastnosti

V tabulce 3 jsou základní mechanické vlastnosti kompozitu s různými matricemi a jednosměrnou výztuží s uhlíkovými vlákny.

Charakteristika	AS4/PEKK	T650/PEI	AS4/PEEK
Objemový podíl vláken %	60	58	61
Pevnost v tahu 0° [MPa]	1965	2050	2070
Modul v tahu 0° [GPa]	127	139	138
Pevnost v tlaku 0° [MPa]	1068	1720	1283
Modul v tlaku 0° [GPa]	121	133,5	124
Pevnost v tlaku s otvorem [MPa]	325	321	324
Pevnost v tlaku po rázu [MPa]	274	352	338

Tabulka 3 Základní mechanické parametry kompozitu s jednosměrnou C-výztuží

Polotovary pro výrobu

Polotovarem je podobně jako v případě prepregu u termosetů opět výztuž, která má na sobě nanesenou matici. To může být provedeno různou formou.

- 1) Semipreg je výztuž, která je částečně prosycena matricí. To je však obtížná operace, protože v porovnání s termosetovou pryskyřicí má termoplast podstatně vyšší viskozitu. Někdy se volí elektrostatické nanášení malých částic pojiva na tkaninu, jindy se položí na tkaninu fólie a pak se zalisuje.
- 2) Pro méně náročné aplikace se používá tkanina z výztuže, která má ve vazbě rovněž pramence termoplastu.
- 3) Dalším často používaným polotovarem je kompaktní rovná monolitní deska, která již má předepsanou skladbu vrstev a pouze se následně tváří za tepla.

Technologie zpracování

Podle polotovaru i podle typu a tvaru dílu se volí vhodná technologie zpracování.

Základní krok je lisování vrstev za zvýšené teploty. Pokud se skládá díl ze semipregu, tak se musí při skládce do formy každá vrstva fixovat tepelným bodovým zdrojem před vlastním lisováním. Pokládání vrstev může probíhat i strojově (viz obrázek 2). Lisování může proběhnout v lise ale v některých případech i v autoklávu.



Obrázek 2. Pokládka vrstev strojem*

Další technologie je pokládání pásku s jednosměrnou výztuží s kontinuálním ohřevem a současným lisováním při odvalování dotlačovacího nástroje. Taková technologie se používá například na ovíjené nádoby.

Formy

Pro výrobu skořepin se nejčastěji používá technologie lisování s použitím lisu, který má buď vyhřívané desky nebo ohřívanou formu. Forma je dvoudílná přičemž jedna část je kovová a druhá kovová nebo silikonová. Obě kombinace mají své výhody a je nutné volit podle konkrétní situace tvaru dílu, požadované přesnosti tvaru, tloušťek a kvality povrchu apod.

*Foto : Airbus



Obrázek 3. Forma kov – kov (LLV)



Obrázek 4. Forma silikon – kov (LLV)

Vlastní proces

Proces sestává ze dvou hlavních kroků. Nejdříve se musí připravený polotovar



Obrázek 5. Lis s pecí pro výrobu dílů

nahřát na požadovanou teplotu. To se obvykle provádí v IR peci. Polotovar je přitom zavěšen v systému, který umožní po dosažení požadované teploty zpracování jeho rychlé přemístění do lisovacího prostoru.

Následuje lisování ve formě. Rychlosti přemístění polotovary a zavírání formy jsou velmi důležitým parametrem, protože krystalizace probíhá během několika sekund.

Celý cyklus trvá dle tloušťky materiálu od 5 do 10 minut. Na obrázku 5 je lis, který má v zadní části připojenou IR pec. Propojení mezi oběma pracovními sekcemi je zajištěno kolejnicemi, po kterých se pohybuje rám nesoucí polotovar. Zařízení pracuje v plně automatickém režimu.

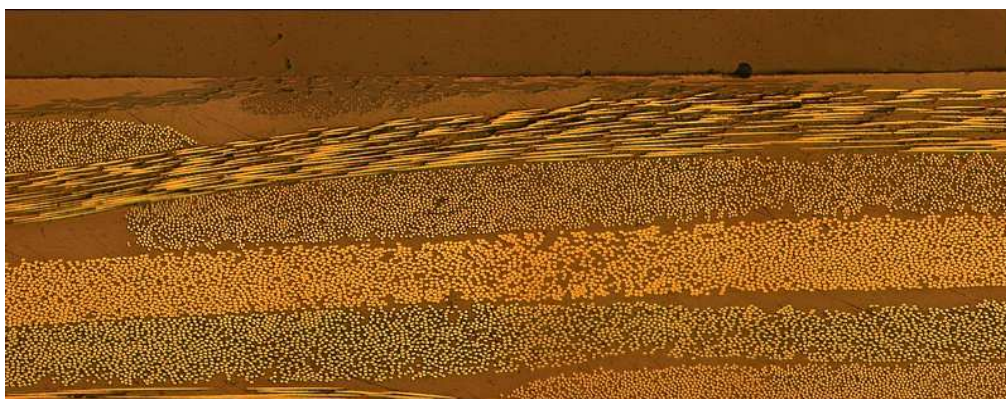
Příklady aplikací

Nejznámější zahraniční aplikací je náběžná hrana pro letouny A340 z kompozitu C/PPS, kde bylo při montáži použito i svařování.



Obrázek 6. Náběžná hrana z materiálu C/PPS (Fokker Aerostructures)

Firma LLV vyvinula a vyrábí popsanou technologii z C/PPS mimo jiné díly do interiéru A400M (viz obr. 8 a 9), které jsou následně spojovány nýtováním.



Obrázek 7. Materiál s C-tkaninovou výztuží a krycí G-tkaninou

Protože se jedná o sestavu, kde se vyskytují i kovové díly, má materiál C/PPS na povrchu z obou stran použítu skleněnou tkaninu nízké plošné hmotnosti (viz obrázek 7).



Obrázek 8. Díly z materiálu C/PPS



Obrázek 9. Díly materiálu C/PPS a G/PPS

Závěr

Kompozity s termoplastovou maticí mají mnoho výhodných vlastností a tendence jejich rychle zvětšujícího se podílu v aplikacích bude nadále pokračovat. Musí se však přitom překonávat mnoho omezení, jako je například vysoká cena materiálu (pro C/PPS je to cca 4 tis. Kč/kg), drahé formy a nové technologické problémy, které se u termosetů nevyskytovaly. Není rovněž možné používat identická konstrukční řešení jaká jsou uplatňována u termosetů.

Správným přístupem konstruktéra je maximální využití znalostí o materiálu a technologii, tak aby se optimálně uplatnily silné stránky tohoto moderního materiálu.

Literatura:

- [1] Stark Aerospace: Thermoplastics Co Consolidation, SETEC 2006 Toulouse
- [2] Hansmann H., ASM Handbook Composites, FB MVU, Werkstofftechnologien/Kunststofftechnik, Oct. 2003.
- [3] Ten Cate, Data Sheet of Cetex