

KOMPOZITOVÉ MATERIÁLY: BUDÚCNOSŤ LETECTVA?

Možnosti využitia nových materiálov v konštrukcii lietadiel.

Ing. Andrej Čiger

Katedra leteckej dopravy, Fakulta PEDaS, Žilinská univerzita v Žiline, Slovensko

andrej.ciger@fpedas.uniza.sk

Abstrakt – Aj napriek využívaniu pokročilých technológií a zvyšovaniu efektívnosti výroby, náklady pri výrobe narastajú. Tento jav môže byť spojený s využitím drahých pokročilých materiálov, ako napríklad titán a drahé kompozitové materiály, ktoré redukujú hmotnosť lietadla. Mnohokrát výrobu predražuje ojedinelosť požadovaných komponentov. Využitie kompozitových materiálov si našlo pevné miesto v letectve. Materiály sa vyznačujú vysokou odolnosťou voči extrémnym teplotám a chemickým látkam. Vyznačujú sa výbornými mechanickými vlastnosťami a sú pomerne lacné. Potenciálnym náhradníkom, ktorý vo veľkej miere splňa podmienky kladené na materiály v leteckej doprave, je kompozitový materiál vystužený bazaltovým vláknom. Tento článok popisuje historický vývoj kompozitových materiálov a pojednáva o možnostiach využitia bazaltu ako výstuhy v kompozitových materiáloch a jeho začlenení sa do bežnej praxe v leteckom priemysle. Ďalej sú popísané jeho fyzikálne a chemické vlastnosti a možné oblasti použitia..

Kľúčové slová – Kompozitový materiál, Letecká doprava, Nové technológie, Vystuženie, Vlákno, Matrica, Bazaltové vlákno, S-N krivka, Epoxid, Nízka cena, Čadič.

Úvod

Letecká doprava je najdynamickejšie sa rozvíjajúcim odvetvím dopravy. Za viac ako sto rokov bol dosiahnutý technologický pokrok, ktorý je takmer nepredstaviteľný. Keď bratia Wrightovci po prvý krát vzlietli, spustili etapu v ľudskej spoločnosti, ktorá je veľmi progresívna, dôležitá a požadovaná. Porovnávať dnes prvé klzaky zobrazené v Da Vinciho kresbách s moderným dopravným lietadlom sa dá len veľmi ťažko, nakoľko letectvo, aké poznáme dnes je špičkou ľudského umu. Za tých niekoľko etáp, ktoré letectvo ako celok prekonalo, sa menilo aj poslanie samotných lietadiel. V prvom rade to bola túžba spoznávať svet z výšky. Nasledovalo však obdobie kedy boli lietadlá použité v tej najdokonalejšej forme ako zbraň vo svetových konfliktach. Avšak ľudia neprestali bádať a lietadlá dodnes plnia obrovské množstvo mierových operácií a pomáhajú spájať všetky kúty sveta vo veľmi krátkom čase. Vývoj sa neustále ženie vpred a okrem skúmania našej planéty sa ľudstvo dostalo aj do ďalekého vesmíru.

Obrovská priorita je dnes v civilnom letectve kladená na využitie najmodernejších technológií, ktoré čo najmenej ekologicky zaťažia našu planétu. Lietadlá čoraz častejšie

poháňajú pohonné jednotky s čo možno minimálnou spotrebou, emisiami a hlukom. V samotných konštrukciách lietadiel sa kladie dôraz na využívanie moderných materiálov, ktoré sú ľahké a disponujú priaznivými fyzikálnymi a chemickými vlastnosťami. Lietadlá dosahujú stále vyššie cestovné rýchlosti a cestovné hladiny. Konštruktéri a dizajnéri využívajú najsofistikovanejšie výpočty pre dosiahnutie požadovaných aerodynamických vlastností a komfortu cestujúcich. V nasledujúcej časti budú popísané samotné kompozitové materiály, ako aj historický vývoj používaných materiálov v konštrukciách lietadiel. Následne budú popísané vplyvy na konštrukciu v závislosti od zvoleného materiálu.

NÁSTUP KOMPOZITOVÝCH MATERIÁLOV

V tejto časti budú všeobecne popísané kompozitové materiály a následne ich zavedenie do leteckého priemyslu. Zavedenie pokročilých materiálov v modernej technológii nastalo až v dvadsiatom storočí a prinieslo lepšie mechanické a fyzikálne vlastnosti oproti predošle používaným materiálom.

Kompozitový materiál pozostáva z dvoch, alebo viacerých rozdielnych materiálov, ktoré majú odlišné charakteristiky. Ich spojením, či už chemickou, alebo fyzikálnou silou vzniká nový materiál s atribútmi samotných komponentov.[1]

Výskyt kompozitových materiálov je možné úplne bežne vidieť v prírode. Ako veľmi dobrý príklad nám poslúži drevo, kosti, alebo stebá trávy. Ak sa bližšie pozrieme na samotný strom, tak tento prírodný produkt predstavuje prototyp prírodného kompozitového materiálu. Drevo je tvorené dlhými vláknami a tvrdými bunkovými štruktúrami, ktoré sa nazývajú celulóza. Tieto dve látky sú spolu spojené do jednotného celku proteínom zvaným lignín. Tento typ konštrukcie s pozdĺžnymi vláknami poskytuje ideálnu oporu pre kmeň a konáre stromu. Samotné uzly stromu sa vždy stýkajú v oblúkoch s veľkým polomerom. Strom je skrátka pomerne pevný a pružný zároveň, čo ho chráni pred zlomením v silnom vetre. Ak sa bližšie pozrieme na kosti, pridáme na to, že sú tvorené mäkkým proteínom – kolagénom a pevným, ale krehkým minerálom – apatitom. Ľudia prichádzali do styku s kompozitovými materiálmi od nepamäti, v rôznych formách. Pomocou nich skonštruovali svoje príbytky (tehly), lode (drevo) alebo zbrane (luky, šípy). [2]

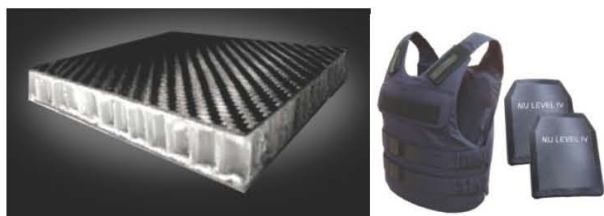
V predošlom odstavci sme popísali ako kompozitové materiály pomáhali ľudstvu počas celých storočí. Následne sa

zameriame na predošlé storočie, kedy moderné kompozitové materiály zaujímajú vedúcu pozíciu v niekoľkých odvetviach priemyslu, ako je strojárstvo, automobilový priemysel, stavebníctvo a samozrejme letectvo. V mnohých prípadoch kompozitové materiály optimalizujú konštrukcie svojou vysokou odolnosťou voči mechanickému, alebo chemickému poškodeniu a súčasne znižujú hmotnosť samotnej konštrukcie. Slama, ktorá v stavebníctve vystužovala hlinu, je dnes nahradená betónom s vláknami karbónu, Kevlaru, alebo inými textíliami. Dokonca aj samotná oceľ je často nahrádzaná vláknom vystuženými polymérmi (FRP – Fiber-Reinforced Polymers). Aj v automobilovom priemysle nastal výrazný pokrok, kde sú hlavné súčasti konštrukčných celkov často vyrábané z uhlíkom vystužených kompozitových materiálov. Okrem vyššie spomínaných spôsobov využitia sa kompozitové materiály často využívajú aj vo veternej energetike. Nesporná výhoda spočíva v tom, že je možné vytvoriť komponent ľubovoľného požadovaného tvaru, čo značne zjednodušuje a redukuje počet stavebných prvkov konštrukcie.



Obrázok 1: Uhlíkom vystužený polymer: [3], [4], [5]

Multifunkčné kompozitové materiály (MFC – Multifunctional Composite Materials) sa využívajú k plneniu niekoľkých funkcií zároveň. Pridané vlastnosti materiálov nesúvisia priamo s hlavnou konštrukčnou funkciou, ale plnia len akýsi sekundárny účel. Pod týmto pojmom sa rozumie termoregulácia, ochrana proti hluku, vytváranie alebo skladovanie elektrickej energie. V mnohých prípadoch slúžia MFC aj ako ochrana proti radiačnému žiareniu. Veľmi jednoduchý prípad multifunkčného kompozitového materiálu je sendvič so zabudovanými solárnymi panelmi využívaný v konštrukcii striech. Značne rozšírené je aj ich využitie v armádnych zložkách. Pre ilustráciu budú spomenuté niektoré príklady využitia MFC v ochranných vestách vojakov, polície a u vozidiel, ktoré teoreticky môžu čeliť poškodeniu. Tieto veľmi ľahké balistické kompozitové materiály sú schopné výrazne pohltiť, prípadne zastaviť projektily, alebo úlomky letiace vysokou rýchlosťou, vďaka husto prepleteným aramidovým vláknam. [6]



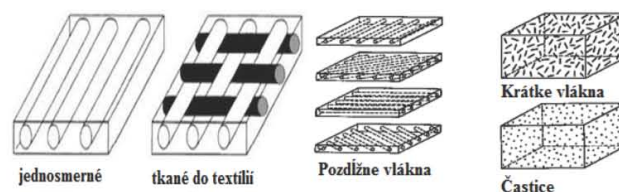
Obrázok 2: Kompozitový sendvič a balistický kompozitový materiál: [7], [8]

Bolo spomenuté, že kompozitový materiál je tvorený dvomi, alebo viacerými rôznymi komponentami, avšak vysoké

množstvo technicky používaných materiálov je tvorených dvomi látkami, ale nie sú to kompozity v pravom slova zmysle. Takmer všetky druhy ocele a zliatiny kovov, by sa podľa predošlej definície charakterizovali ako kompozitové materiály. Nie je to však pravda. Aby sme lepšie porozumeli, čo konkrétne charakterizuje kompozitový materiál v jeho podstate, popíšeme v nasledujúcej časti niekoľko podmienok a terminológiu.

- Kontinuálna matrica je tvorená dvomi prvkami, z ktorých jeden je vystužujúci a je zapustený v druhom prvku, alebo hmote. Týmto vzniká kompozitový systém matrice a vystuženia.
- Matrica a druhá vystužujúca zložka spolu nemajú žiadny fyzikálny súvis a sú pôvodne separátne. Ich spojenie vzniká pri procese výroby. Ani jeden komponent nie je výsledkom vnútorných procesov iného prvku kompozitu.
- Častice druhého prvku nie sú len molekuly ale mechanické častice s veľkosťou niekoľko mikrometrov
- Vystužujúce vlastnosti vyplývajú z vlastností vystužujúceho prvku preniesť, rozložiť, alebo odolať zaťaženiu.
- Podiel, v ktorom je zastúpený druhý, vystužujúci prvok je v kompozitovom materiáli minimálne 10%. [9]

V niekoľkých prípadoch použitia nanotechnológií je možný výskyt výnimiek, ale vo všeobecnosti môžeme povedať, že sú predošlé podmienky platné. Ak to bude potrebné a vývoj naberie nový rozmer, určite budú všeobecné pravidlá platné pre kompozitové materiály upravené a rozšírené. Vo všeobecnosti sú FRP (Fiber-Reinforced Polymeres) kompozitové materiály tvorené vláknami, ktoré daný kompozit vystužujú a polymérom, ktorý tvorí matricu a obklopuje vlákna. Toto zloženie je schopné rozložiť zaťaženie a sily pôsobiace na danú látku. Avšak samotné vlákna prenášajú zaťaženie len v jednom smere. Ak by sme chceli dosiahnuť prenos síl v rôznych smeroch, je potrebné ukladať vlákna pod rôznymi uhlami, alebo ich zviazať do jednotnej tkaniny. Kompozitové materiály môžu byť tvorené aj čiastočkami, ktorých rozmery sú takmer totožné vo všetkých dimenziách. Avšak tento typ nie je takmer vôbec rozšírený v leteckom priemysle.



Obrázok 3: Kompozitové vlákna a textílie: [10], [11]

Vo všeobecnosti je matrica kompozitových materiálov tvorená tromi látkami ako napr. polymér (PMC – Polymer Matrix Composites) vystužený vláknami skla, aramidu, uhlíka a inými. Ďalšou látkou tvoriacou matricu je keramika (CMC – Ceramic Matrix Composites) vystužená krátkymi a dlhými vláknami rôzneho materiálu. Veľmi známou matricou je sklo. Osobitú kategóriu kompozitových matric tvorí kov (MMC – Metal Matrix Composites). Tieto kompozity sa vyznačujú

vysokou silou a odolnosťou voči vonkajším vplyvom a vysokej teplote. Samotná matrica je vystužená vláknami uhlíka, hliníka a iných kovov.

Letectvo prekonalo niekoľko etáp používaných materiálov. Ako prvý materiál bolo používané drevo, či už v jeho prírodnej forme, alebo chemicky ošetrované. Bolo povedané, že aj drevo je kompozitový materiál, avšak v tomto prípade ide o jeho prírodnú formu. V polovici tridsiatych rokov prišla na rad v konštrukciách zliatina hliníka – dural. Drevo bolo vytlačené na pokraj výroby a kovy a ich zliatiny pokryli takmer celý proces výroby. Kovový trup umožnil lietadlám lietať vo veľkých výškach a neporovnateľne vyššími rýchlosťami. V štyridsiatych rokoch boli kompozitové materiály použité po prvýkrát v letúne Spitfire Britského kráľovského letectva. V tomto lietadle bol použitý kompozitový materiál tvorený ľanovými vláknami v živicovej matrici. V niekoľkých prípadoch boli využité aj sklenené vlákna. Po druhej svetovej vojne prišli do výroby úplne nové vlákna, ako napríklad bórové (1966), uhlíkové (1968), aramidové (1972) a polyetylénové vlákno (1987). Kým sa v konštrukciách od celokovových prešlo ku kompozitovým, museli sa vývojári vysporiadať problémami, ako napríklad nedostatok vedomostí o materiáloch, a nepredvídateľnosť v ich správaní, anizotropické zloženie, horľavosť a krátka životnosť. Dnes je ich zloženie a správanie pomerne dobre známe a je možné toto správne predvídať. Množstvo z nich je dnes považované za nehorľavé. Okrem iného sa vyvinuli aj metódy kontroly a záznamov, ktoré prispievajú k zvýšeniu bezpečnosti. [12], [13]

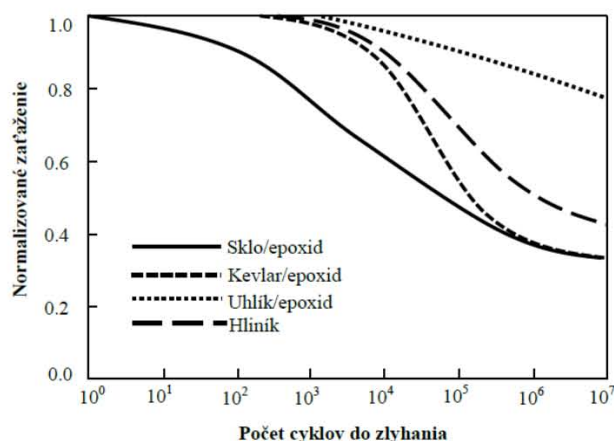
Používanie kompozitových materiálov so sebou prináša množstvo výhod. Jednou z hlavných výhod je ich nízka hmotnosť a odolnosť voči veľkému zaťaženiu. Nízka hmotnosť lietadla výrazne znižuje spotrebu paliva. Výhodou je, že je možné vytvoriť diel takmer ľubovoľného tvaru, čo môže prispieť k čistejšiemu aerodynamickému tvaru lietadla. Použitie kompozitov redukuje počet komponentov potrebných v konštrukčných celkoch. Tieto materiály odolávajú korózii, chemikáliám a vplyvom počasia. Jednoduchosť konštrukcie prispieva k znižovaniu výrobných nákladov.

K hlavným nedostatkom kompozitových materiálov patrí ich nízka odolnosť voči poškodeniu kovovými materiálmi. Vzniknuté poškodenie na konštrukcii sa pomerne náročne opravuje. Samotné skladovanie musí prebiehať v špeciálnych podmienkach, ako je napríklad tlak a nízka teplota. Aj samotné spracovanie kompozitových materiálov vo výrobe si vyžaduje špecifické techniky a precíznosť. Pri procese opravy komponentu je potrebné ho vysušiť a samozrejme očistiť od nečistôt. Dlhodobé únavové vlastnosti matric doposiaľ nie sú známe. Preto ich zavedenie do leteckého priemyslu bolo sprevádzané veľkým množstvom obštrukcií. [14]



Obrázok 4: Chronologický vývoj používaných materiálov v letectve: [15], [16], [17]

Používanie kompozitových materiálov podlieha neustálemu testovaniu a skúmaniu ich únavových vlastností. V prípade stanovenia limitov, sú reprezentatívne vzorky a komponenty cyklicky testované s konštantnou amplitúdou a spektrom rôznych zaťažení v rozsahu podmienok očakávaných v reálnej prevádzke. Simuluje sa prevádzka vo vysokých, ale aj nízkych teplotách pri vysokej vlhkosti prostredia. Kompozity sú veľmi odolné voči zaťaženiu, avšak proces delaminácie prichádza náhle a môže mať katastrofálne následky. Závislosť zaťaženia na počte cyklov vyjadruje S-N krivka. V nej sú zobrazené závislosti rôznych kompozitových vlákien a matric. Pre porovnanie je definovaná krivka aj pre hliník, používaný v leteckých zliatinách. [14]



Obrázok 5: Porovnanie S-N krivky kompozitov s epoxidovou matricou a hliníka: [14]

MOŽNOSTI VYUŽITIA BAZALTU AKO MATERIÁLU V KONŠTRUKCIÁCH

Každý priemyselný výskum má za cieľ priniesť do praxe novú technológiu, materiál a podobne. Veľký dôraz sa kladie na environmentálne vplyvy, energetickú náročnosť výroby, koroidné a iné vlastnosti v samotnom procese vývoja. Bazaltové vlákna tvoria prírodný materiál vyrobený z magmatických skál čadiča. Čadič sa prejavuje pomerne vysokou odolnosťou voči vonkajším vplyvom a malou hmotnosťou. Hlavným cieľom článku je potvrdiť pevnosť a tuhosť čadiča ako materiálu, ktorý v spojení s živicovou matricou poskytne požadované vlastnosti pre letectvo.

Čadič je prírodný materiál, ktorý sa vyskytuje v sopečných horninách. Jeho hlavné využitie je v strojárstve, stavebníctve a priemysle, primárne v jeho drvenej forme. Čadič je možné topiť pri 1300 až 1700° Celzia a následne vytvárať vlákna. Jeho pozdĺžne vlákna môžu slúžiť v kombinácii s iným materiálom ako výstuha v kompozitových materiáloch. Táto kombinácia (napr. Bazalt – Uhlík) prináša nevšedné fyzikálne vlastnosti. Napríklad komponenty vyrobené z čadičových vlákien, alebo na báze čadiča plnia funkciu zvukovej izolácie, alebo naopak funkciu ochrannú (napr. čadičová vlna, ochrana motora). Okrem zvukovej, plní čadič aj funkciu tepelnej a elektrickej izolácie (ochrana elektrických káblov, požiarová ochrana). Komponenty sa vyrábajú na báze tvrdennej živice (epoxid a polyester). Bazaltové vlákna poskytujú pri nízkej cene vysokú úžitkovú hodnotu. [18]



Obrázok 6: Čadičové vlákno: [19], [20]

Medzi hlavné výhody využitia čadiča ako materiálu v konštrukciách patrí:

- Vysoká odolnosť voči chemickým látkam, aj kyselinám.
- Vysoká tepelná odolnosť a nízka horľavosť.
- Relatívne vysoká mechanická odolnosť, odolnosť voči oderu a poškodeniu a pružnosť.
- Nízky úbytok pevnosti pri vysokých teplotách.
- Vyššia pevnosť v ťahu ako oceľové vlákno rovnakých rozmerov.
- Vynikajúce tepelné, akustické a elektrické izolačné vlastnosti.
- Vysoká priľnavosť k polymérovým živiciam a kaučuku.
- Ekologický neškodný a netoxický materiál

Nasledujúca rovnica vyjadruje mieru poškodenia bazaltovým vláknom vystuženého jednoduchého a hybridného kompozitového materiálu.

$$E_{\infty} = E_0 + \sum_{k=1}^N E_k g_{\infty} \left(\frac{t_{0k}}{\tau_k} \right) \quad (1)$$

Kde: E_0 , E_k sú modulové parametre, g je faktor času, t , τ sú časové konštanty. Z vyššie uvedenej rovnice vyplýva, že použitie bazaltového vlákna výrazne zvyšuje pevnosť kompozitových materiálov v ťahu. [21]

Objemový podiel vystužujúcich vlákien je možné vypočítať podľa nasledujúcej rovnice.

$$V^f = \frac{m^f / \rho^f}{m_{tot} / \rho_{tot}} \quad (2)$$

Kde: V^f je objemový podiel vystužujúcich vlákien, m^f je hmotnosť vystužujúcich vlákien, ρ^f je hustota vystužujúcich vlákien, M_{tot} je celková hmotnosť (hmotnosť vystužujúcich vlákien a hmotnosť matrice), ρ_{tot} je celková hustota (hustota výstužných vlákien a hustota matrice). [22]

Kompozitové materiály sú v konštrukcii akceptované viac ako dvadsať rokov a samotné bazaltové vlákno približne desať rokov. Nasledujúca Tabuľka 1 popisuje pevnostné vlastnosti polymérov vystužených čadičom, skleneným vláknom a uhlíkom. Bazaltové vlákno má o 10 až 20% vyšší modul pružnosti v ťahu ako polyméry so skleneným vláknom.

Tabuľka 1: Porovnanie pevnostných charakteristík polymérov.

	Pevnosť (MPa)	Modul pružnosti (GPa)	Predĺženie pri pretrhnutí (%)
BFRP	899	50,3	1,8
GFRP	825	40,8	-
CFRP	2100	124,0	1,7

BFRP- Basalt fiber reinforced polymers (Čadič)

GFRP - Glass fiber reinforced polymers bars (Sklo)

CFRP - Carbon fiber reinforced polymers bars (Uhlík)

Potenciálne je možné, že čadičové vlákno zastúpi kompozitové materiály tvorené skleneným vláknom, nakoľko majú pomerne podobné fyzikálne vlastnosti, ktoré popisuje Tabuľka 2. [23]

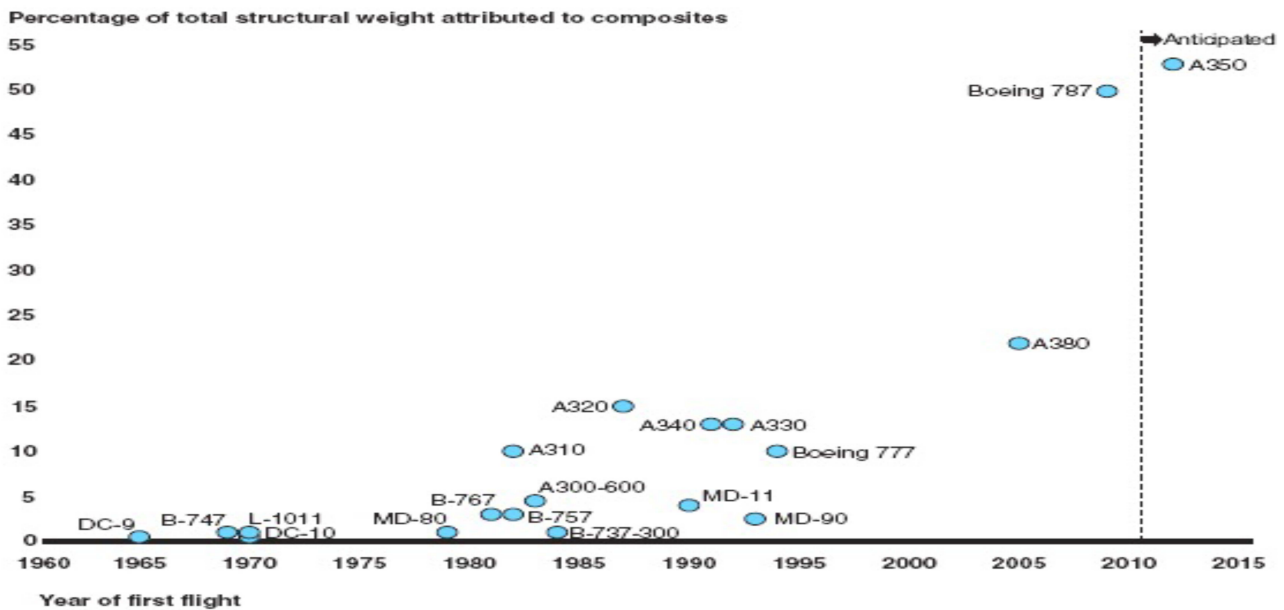
Tabuľka 2: Fyzikálne vlastnosti čadičového a skleneného vlákna

	S y m b o l	Znač.	Vys. kval. čadičové vlákno	Pozdĺžne čadičové vlákno	Sklen. vlákno
Hustota	ρ	g/cm ³	2,645	2,740	2,48- 2,54
Pevnosť (Vickers 50g – 15s pri 20°C)	-	HV	6,800	7,000	5,60

Čadičové vlákna sa používajú pri výrobe textílií odolných voči ohňu, brzd a brzdových doštičiek a v leteckom priemysle ako náhrada komponentov, ktoré sú predražené obsahom uhlíka. Použitie v leteckom priemysle bude popísané v nasledujúcich riadkoch.

V letectve sa potenciálne kompozitové materiály vystužené čadičovým vláknom môžu využiť v konštrukcii brzd a ich súčastí, v interiéri lietadiel, v podobe akýchkoľvek panelov a krytiel, častí sedadiel a filtrov. V neposlednom rade vo výrobe tepelných izolantov a nehorľavých dielov.

Všeobecne sa kompozitové materiály v letectve každým rokom používajú vo väčšom množstve. Obrovský potenciál je vo vojenskom, ale aj civilnom letectve. Podiel kompozitov v konštrukciách lietadiel sa zvýšil z predošlých 20%, až na hodnotu prevyšujúcu 50%. Daný podiel na konštrukcii pre vybrané typy znázorňuje nasledujúci graf.



Obrázok 7: Použitie kompozitových materiálov vo vybraných konštrukciách civilných lietadiel: [24]

Ako je možné vidieť vyššie, kompozitové materiály sa využívajú pri výrobe jednoduchých dielov, až po výrobu celých lietadiel. Čadičové vlákna môžu byť kombinované s rôznymi materiálmi pre dosiahnutie požadovaných vlastností.

ZÁVER

Kompozitové materiály sú budúcnosťou leteckého priemyslu. Vývoj materiálov, ktoré môžu byť neustále vystavované extrémnym podmienkam je nesmierne drahý. Využitie „hi-tech“ kompozitových materiálov so sebou prináša nové možnosti v oblasti konštrukcií lietadiel, kedy je možné zredukovať počet komponentov so súčasným znížením výrobných nákladov. Netreba zabúdať ani na nedostatky kompozitových materiálov, ako je náročnosť skladovania, opráv a niektorých prípadoch aj samotnej výroby. Veľmi nebezpečné sú aj únavové vlastnosti týchto materiálov, ktoré dlhú dobu dokážu odolávať pomerne vysokému zaťaženiu. Samotná únava sa prejaví v rýchlo sa šíriacim defekte, prípadne praskline. Jej prítomnosť môže mať v nosných prvkoch konštrukcie fatálne následky.

Využitie čadičových vlákien v sekundárnych konštrukciách spája ich optimálne vlastnosti s nízkou cenou. Nakoľko sú vyrobené z prírodnej vulkanickej horniny, je ich výroba jednoduchá a ekologicky nezávadná.

POĎAKOVANIE

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu: „*Brokerské centrum leteckej dopravy pre transfer technológií a znalostí do dopravy a dopravnej infraštruktúry; ITMS 26220220156.*“



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/
Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ

REFERENCIE

- [1] Armstrong, Keith B. et al. 1998. *Care and Repair of Advanced Composites*. 1. vydanie. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc., 1998. 552 s. ISBN 978-0-7680-0047-4
- [2] Vassilopoulos A. P.- Keller T. 2011. *Fatigue of Fiber-reinforced Composites*. 1. vydanie. New York: Springer, 2011. 238 s. ISBN 978-1-84996-180-6
- [3] Uhlíkom vystužený polymer. Online. Dostupné na: <http://www.directindustry.com/prod/exel-composites/pultruded-crp-composite-profiles-carbon-fiber-reinforced-plastic-16769-426695.html>
- [4] Využitie kompozitových materiálov v automobilovom priemysle. Online. Dostupné na: https://www.sglgroup.com/cms/_common/images/innovation/carbon-in-mobility/04_sgl_acf/gallery/Passenger-compartment-bwm-i3.jpg
- [5] Kompozitové listy veternej elektrárne. Online. Dostupné na: <http://csmres.co.uk/cs.public.upd/article-images/Vestas-V80-2.0-MW-North-Hoyle-Wales-offshore.jpg>
- [6] Bhatnagar A. 2006. *Lightweight ballistic composites: military and law-enforcement applications*. 1. vydanie. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006. 448 s. ISBN 978-1-8557-3941-3.
- [7] Sendvičový kompozit. Online. Dostupné na: <https://encrypted->

- tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRbSY1d30ZW321Gk47cMNa3h2B-Sz6GhD8-WUMVnxFGyiC2haZ1A
- [8] Balistický kompozitový materiál. Online. Dostupné na: <http://www.innovationintextiles.com/uploads/1479//MAX-7%20vestguard%20plate%20and%20vest.jpg>
- [9] Rösler, J.- Harders, H. –Bäker, M. 2007. Mechanical Behaviour of Engineering Materials: Metals, Ceramics, Polymers, and Composites. 1. vydane. New York: Springer, 2007. 534 s. ISBN 978-3-540-73446-8.
- [10] Kompozitové vlákna a textilie. Online. Dostupné na: https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTQUZd8JANP542hkH4K3ZD-oqzVzuE7xd_Ag7AoYZNGWNVkg_h5
- [11] Kompozitové vlákna a textilie. Online. Dostupné na: http://materialsworld.utep.edu/Modules/Composite/Morehouse%20Composites/MoreHouse%20Composites_files/image102.gif
- [12] Armstrong, Keith B. et al. 2005. Care and Repair of Advanced Composites. 2. vydanie. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc., 2005. 667 s. ISBN 978-0-7680-1062-4.
- [13] Blockley, R.- Shyy, W. et al. 2010. Encyclopedia of Aerospace Engineering: Volume 4- Materials Technology. 1.vyd. Chichester : John Wiley & Sons, Ltd, 2010. 2565 s. ISBN 978-0-470-75440-5.
- [14] Baker, A.- Dutton, S.- Kelly, D.2004. Composite Materials for Aircraft Structures.2. vydanie. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. 597 s. ISBN 978-1-56347-540-5.
- [15] Drevená konštrukcia lietadla bratov Wrightovcov. Online. Dostupné na: <http://turnertoys.com/images/products/3435.jpg>
- [16] Duralová konštrukcia Boeingu B-377. Online. Dostupné na: https://encrypted-tbn1.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQnp5rlYGBm13SkHr0B6A0AXp6ihaJc68MnTujL71z5l57y9B_X
- [17] Konštrukcia s použitím kompozitových materiálov. Online. Dostupné na: http://www.saftbatteries.com/sites/default/files/styles/node-615x345/public/A350XWB_RR_AIB_VL-BDPR.jpg
- [18] Van de Velde K., Kiekens P., Van Langenhove L., Basalt Fibres as Reinforcement for Composites
- [19] Bazaltové vlákno. Online. Dostupné na: http://www.unistarfiberglass.com/uploadfiles/pro_largeimg/3001520130314070746974.jpg
- [20] Fragmenty čadičového vlákna. Online. Dostupné na: <http://www.basaltfiber.com.cn/English/ProductDetail.asp?Id=17&Cate=2>
- [21] Tamás P., Development of basalt fabric reinforced polymer composites, Thesis 2013
- [22] Erlendsson J.: Continuous Basalt Fiber as Reinforcement Material in Polyester Resin, Thesis 2012
- [23] Hui LI, Guijun XIAN, DURABILITY AND FATIGUE PERFORMANCES OF BASALT FIBER / EPOXY REINFORCING BARS, CICE_2012
- [24] Použitie kompozitových materiálov vo vybraných konštrukciách civilných lietadiel. Online. Dostupné na: http://www.1001crash.com/dossier/composite/percentage_composite.gif
- [25] BUGAJ, M., Non-destructive testing in aircraft maintenance [Nedeštruktívne skúšky v údržbe lietadiel]. In: New trends in civil aviation 2013 : Žilina, 21.-22. June 2013. - Brno: CERM, 2013. - ISBN 978-80-7204-843-4. - S. 6-8.
- [26] KROLLOVÁ, S., Deployable flight recorders [Záznamník letových dát s výmetom a lokalizáciou] / Turiak Marek, In: Aero-Journal : international scientific journal of air transport industry. - ISSN 1338-8215. - Č. 1 (2013), s. 16-23.