



## USE OF ADVANCED MATERIALS IN AIRCRAFT CONSTRUCTION

**Monika Timková**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

**Martin Bugaj**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina

### Abstract

*The latest subject of research in the aerospace industry is the design and manufacture of the lightest possible aircraft while guaranteeing safety. Due to the ever-increasing requirements for weight reduction, various researches are underway in the field of nanotechnology and its associated possible implementation in aircraft design. The primary focus of this article is the analysis of composite materials, their structure, fabrication and different types of composites. At the same time, it focuses on their use in specific aircraft structural components. The main focus of the work is to analyze the incorporation of nanotechnology in the production of innovative materials used in aerospace industry, as well as to define nanomaterials, namely nanocomposites themselves. The result of the work is an evaluation and prediction of the use and implementation of progressive materials in structural elements and their impact on the economy and performance of aircraft.*

### Keywords

*composite, matrix, weight reduction, nanotechnology, reinforcement, CNT*

### 1. ÚVOD

Malé rozmery, nízka hmotnosť a priaznivé vlastnosti sú cieľové požiadavky na materiály používané v leteckých konštrukciách, hlavne kvôli požiadavkám na redukciiu hmotnosti a s tým spojené zníženie produkovaných emisií a spotreby paliva. Kompozity využívajúce nanovystuženie v podobe CNT predstavujú materiály spĺňajúce dané požiadavky. Čiastkovým cieľom práce je vysvetlenie kompozitných materiálov a ich už známe využitie v letectve, ako aj priblíženie kompozitných častí v jednotlivých typoch lietadla. Následné vystuženie kompozitov nanomateriálmi a predikcie ich implementácie predstavujú primárny cieľ.

### 2. KOMPOZIT

Vo všeobecnosti je kompozit združený umelo vytvorený materiál, zhotovený fyzikálnou kombináciou rôznych materiálov. Pozostáva z dvoch alebo viacerých zložiek pričom každá z nich má odlišné vlastnosti a zároveň je medzi nimi jasné rozhranie, teda sa nespájajú. [1] Jednotlivé fázy majú väčšinou iné chemické zloženie a odlišné fyzikálne a mechanické vlastnosti. Prvá fáza tvorí spojité prostredie, nazývaná aj ako matrica. Sekundárna vložená fáza, poprípade aj viaceré fázy, plnia úlohu spevňovania matrice kompozitu a zároveň prenášajú vonkajšie zaťaženie. Vďaka optimálnemu pomeru vzájomného objemu medzi matricou a spevňujúcou fázou, taktiež vhodným výberom jednotlivých materiálov, možno vytvoriť nový materiál, ktorý je nielen vhodnejší ako akákoľvek forma samostatného materiálu, ale nadobúda aj špeciálne vlastnosti, ktoré samotná zložka nemá.

Kompozit je moderným avšak nie univerzálnym materiálom. Navrhovaný je vždy pre konkrétnu implementáciu pri maximalizovaní využitia jeho hmoty. Vlastnosti ako vysoká merná tuhosť a pevnosť, odolnosť voči veľmi nízkym teplotám ale aj výhodné únavové vlastnosti im zabezpečili široké uplatnenie v leteckom priemysle a v konštrukcii dopravných

prostriedkov. Sú vhodné na výrobu výstuže krídiel, nosníkov, vrtule a rotujúcich častí v motore, ako sú lopatky kompresora a turbíny. [2]

#### 2.1. Vlastnosti

Medzi hlavné výhody využitia kompozitov v konštrukcii lietadiel okrem ich nízkej hmotnosti patrí aj vysoká statická pevnosť, dobrá tepelná odolnosť ako aj odolnosť voči korózii. Ich vhodné únavové vlastnosti zvyšujú životnosť leteckých konštrukcií, znižujú frekvenciu a náklady na údržbu. Vďaka možnosti vytvorenia dielu s ľubovoľným tvarom prispieva k čistejšiemu aerodynamickému povrchu lietadla a zredukovaniu množstva potrebných komponentov v konštrukčných celkoch. Následne dochádza aj k zníženiu potreby spojovacích prvkov a spojov, ktoré môžu predstavovať náchylné miesta na poškodenie komponentu. Na druhej strane sú s použitím kompozitov spojené vysoké náklady na výrobu materiálu ale aj ich opravy. [3]

#### 2.2. Matrica

Úlohou matrice je spájať dohromady spevňujúce vlákna v kompozitoch, zabezpečiť ich správne rozmiestnenie v priečnom reze a s tým spojené priaznivé mechanické vlastnosti ako odolnosť voči trhlinám a poškodeniu. Taktiež musí byť matrica dostatočne pružná pre elimináciu jej porušenia pri namáhaní ťahom a to ešte skôr ako by došlo k poruche vlákna.

Matrica na rozdiel od výstuže má nižšiu pevnosť, avšak je pružnejšia. Pre zníženie celkovej hmotnosti kompozitného materiálu sa u matrice využíva nižšia hustota, ako má spevňujúca fáza. Predstavuje hlavného nositeľa všetkých dôležitých chemických a mechanicko – fyzikálnych vlastností. Jej základnou funkciou je prenášanie vnútorného zaťaženia na sekundárnu vloženú fázu. Úloha matrice je všeobecne

zvyšovaná so znižujúcim sa obsahom vystužujúcej fázy. Na základe druhu zvoleného materiálu rozlišujeme kompozity s kovovými, polymérnymi a keramickými matricami.

#### 2.2.1. Kompozity s kovovou matricou (MMC)

MMC najčastejšie využívajú materiály na báze hliníka, horčíka a titánu.

- Vhodným vystužením kompozitu s hliníkovou matricou (AMC) je možné ešte výraznejšie znížiť ich hustotu a to aj pri ich súčasnom markantnom zvýšení tuhosti. Výhody AMC zahŕňajú vyššiu pevnosť a tuhosť, možnosť prevádzkovania vo vyššom teplotnom rozsahu, väčšiu odolnosť materiálu voči poškodeniu a takisto voči opotrebovaniu. AMC nachádzajú využitie napr. v podvozkoch lietadiel, vysokotlakových tesneniach a motoroch.
- Kompozity s horčíkovou matricou (Mg MMC) sú vynikajúcimi materiálmi na využitie pri ľahkých konštrukciách pre vojenské a civilné letecké aplikácie vďaka ich nízkej hustote. Využitie nachádzajú napríklad v drážkach piestnych krúžkov, rotoroch, ložiskách prevodoviek a ozubených kolesách. Nevýhodou je zložitejší výrobný proces, s ktorým sú spojené aj vyššie výrobné náklady. Vzhľadom na ich nízku hmotnosť sa MMC považujú za žiaduce materiály pre konštrukcie lietadiel, pri ktorých je zníženie hmotnosti hlavným faktorom. Potreba ďalšieho výskumu je však nutná s cieľom zlepšenia mechanických vlastností horčíka a jeho zliatin na efektívne využitie v leteckom priemysle.
- Kompozity s titánovou matricou (TMC) sa vo veľkej miere používajú v leteckom, lodnom a automobilovom priemysle vďaka ich vynikajúcej odolnosti proti korózii a vysokej pevnosti pri zvýšených teplotách v porovnaní s hliníkovými zliatinami, čo je výhodné pri konštrukcii lietadiel a rakiet s vyššími prevádzkovými rýchlosťami a teplotami. Sú vhodným materiálom na použitie v podvozku. [4]

#### 2.2.2. Kompozity s polymérnou matricou (PMC)

PMC sú jedným z najľahších kompozitných materiálov. Vykazujú vysokú prevádzkovú pevnosť, avšak sú citlivými na vysoké teploty. Je možné ich rozdeliť do troch skupín: reaktoplasty, termoplasty, elastoméry. Základným rozdielom je možnosť ich pretváranie po zohriatí. Termoplasty aj elastoméry túto vlastnosť majú zatiaľ čo reaktoplasty vo fáze vytvrdzovania majú termosety zosieťované polymérne reťazce, čo na konci vedie k vzniku tuhého výrobku, ktorý sa nedá pretvárať.

Polymér vystužený uhlíkovými vláknami nadobúdajú materiálové vlastnosti ako vysoká tuhosť a pevnosť, odolnosť voči ohňu a teplu, odolnosť voči únave, korózii a vibračné tlmiace vlastnosti. Tie ho robia vhodným konštrukčným materiálom na výrobu rámov lietadla, trupu, krídel, chvostových plôch atď.

Do skupiny PMC patrí aj najstaršie priemyselne vyrábaný kompozit sklolaminát. Taktiež je aj najbežnejším kompozitným materiálom, ktorý pozostáva zo sklenených vlákien vložených do matrice z epoxidovej alebo polyesterovej živice. [5]

#### 2.2.3. Kompozity s keramickou matricou (CMC)

CMC boli navrhnuté pre letecké konštrukcie, ktoré vyžadujú vysokú pevnosť a odolnosť voči tvoreniu trhlin. Okrem toho sa vyznačujú nízkou hmotnosťou, nízkou tepelnou rozťažnosťou, odolnosťou voči vysokým teplotám, oxidácii a odolnosťou voči katastrofickým poruchám. V porovnaní s tradičnými konštrukčnými materiálmi, ako sú kovy, CMC sú oveľa odolnejšie voči agresívnemu prostrediu a vysokým teplotám. Práve vďaka ich tepelnej odolnosti sú vhodnými materiálmi pri výrobe spaľovacích motorov, turbín a nadzvukových lietadiel. Vhodné použitie predstavujú aplikácie v motoroch, na turbínových lopatkách a v brzdovom systéme. [4]

### 2.3. Výstuž

Sekundárnu vložnú fázu, teda výstuž môžu tvoriť vlákna, častice alebo whiskery. Vyrobené sú z materiálov ako polyméry, keramika alebo kovy a sú zásadne používané na zvýšenie mechanických vlastností kompozitu. Poskytujú zväčšenú úroveň pevnosti a tuhosti. Prenášajú 70 – 90 % vyvíjaného zaťaženia. Okrem štruktúrnych vlastností môžu poskytovať aj elektrickú a tepelnú vodivosť, vyššiu odolnosť proti opotrebovaniu alebo riadenú tepelnú rozťažnosť. Hlavným rozdielom medzi kompozitmi vystuženými časticami a vláknami je závislosť ich vlastností od smeru pôsobenia. Časticové kompozity sú izotropné, teda ich vlastnosti ako pevnosť a tuhosť sú rovnaké vo všetkých smeroch. Vlastnosti kompozitov vystužených vláknami sa naopak menia na základe smeru zaťaženia v závislosti od orientácii vlákien. Možno ich nazvať anizotropnými. [6]

#### 2.3.1. Vystužujúce vlákna, whiskery

Na spevnenie kompozitu sú najčastejšie využívané práve vystužujúce vlákna. Forma výroby môže byť rôzna, napríklad výroba práškovou metalurgiou alebo zalievanie vlákien matricovým materiálom. Uloženie vystužujúcich vlákien môže byť suché a mokré. Suché vlákna neobsahujú živicu na rozdiel od mokrych vláknitých materiálov impregnovaných živicom. Možno ich rozdeliť na kovové, sklené, minerálne, uhlíkové a keramické vlákna. Najvyššou tepelnou odolnosťou disponujú keramické vlákna a to 1500 – 3600 °C. V leteckých aplikáciách sú najvyužívateľnejšími práve uhlíkové vlákna.

Whiskery alebo aj monokrystály boli vyvinuté kovové aj keramické typy avšak kvôli ich vysokej cene sa takmer nepoužívajú. [7]

### 2.4. Kompozity v konštrukcii lietadiel

Najvýraznejším priekopníkom implementácie kompozitu do primárnych konštrukcií lietadiel sa stal Airbus, čoho výsledkom je vedúci produktový rad ekonomických a ekologických prúdových lietadiel – od A320 až po A380. Kompozit bol využitý prvýkrát ako väčšinový materiál v konštrukcii krídla na vojenskom štvormotorovom lietadle A400M "Atlas". Taktiež implementáciou kompozitných materiálov na A350 XWB, a to v podobe až 53 %, sa podarilo spoločnosti Airbus predĺžiť intervaly údržby lietadiel zo 6 rokov na 12. Prvenstvo v percentuálnom použití kompozitov na konštrukciu lietadla pripadá spoločnosti Boeing s lietadlom B787 inak známeho aj pod názvom Dreamliner. Z objemového množstva tvoria až 80 % celkových použitých materiálov. Využitý bol najmä polymér vystužený

uhlíkovými vláknami, konkrétne na veľkej časti trupu, hornom a dolnom plášti krídla, klapkách krídiel, výškovom kormidle, krídielkách a takisto na vertikálnom a horizontálnom stabilizátore.

### 3. NANOTECHNOLÓGIE

Hlavnými hnacími silami súčasného výskumu a vývoja v leteectve sú ľahšie konštrukčné materiály a účinnejšie motory. Spoločným cieľom je zníženie spotreby paliva a emisií uhlíka spojené s leteckou dopravou a nákladnou leteckou dopravou. Nanotechnológie v leteckom a kozmickom priemysle predstavujú potenciál dosiahnutia tohto cieľa.

Pojem nanotechnológia zahŕňa vytváranie a používanie materiálov alebo zariadení v extrémne malých rozmeroch, ktoré majú rozsah 1 až 100 nanometrov (nm) a sú nazývané ako nanokryštály alebo nanomateriály. Progresívna technológia sa využíva na tvorbu nanokompozitov, ktoré patria medzi inovatívne materiály a od bežných kompozitov sa odlišujú svojimi lepšími mechanickými vlastnosťami. [8]

#### 3.1. Nanokompozity

Nanokompozity sú triedou kompozitných materiálov s lepšími mechanickými vlastnosťami, v ktorých sa nanomateriály používajú buď na spevnenie, alebo na zvýšenie funkčnosti kompozitov. Ich použitie na výstuž predstavuje niekoľko výhod, ako napríklad lepšia povrchová úprava, menšia náchylnosť na poškodenie a nízky objemový podiel potrebný na zlepšenie vlastností. Medzi nanomateriály s pozoruhodnými mechanickými vlastnosťami patria uhlíkové nanorúrky a nanovlákná. Ukázalo sa, že sú vynikajúcimi výstužnými materiálmi. [9]

##### 3.1.1. Uhlíkové nanorúrky

Uhlíkové nanorúrky (CNT) sú alotropy uhlíka, ktoré existujú v kvázi jednorozmernej štruktúre. Pozostávajú z grafitu (atómov uhlíka) usporiadaných do hexagonálnej štruktúry vytvárajúcej nanorúrky tvoriace viacero vrstiev. CNT sú materiály s trubicovou štruktúrou vyrobené z vrstiev grafitu v nanorozmeroch s rôznym vonkajším priemerom. Je možné ich považovať za derivát uhlíkových vlákien. Pri rozmiestnení CNT do polymérnych matric sa zvyčajne dosahuje značné zlepšenie mechanických vlastností, spôsobené interakciou medzi nanovýstužou a materiálom matrice prostredníctvom medzifázy a veľkou reaktívnou plochou na jednotku objemu uvedenej nanovýstuže. Zlepšenie mechanických vlastností vzhľadom na vystužené polyméry je silne závislé od hmotnostného podielu CNT, ako aj od rovnomernosti ich disperzie. Kompozity s CNT vykazujú vysokú tepelnú stabilitu, zlepšené elektrické vlastnosti, ako aj vysokú účinnosť tlmenia vibrácií v porovnaní s nevystuženými polymérmi.

Bežne sú klasifikované do dvoch kategórií vzhľadom na kombináciu množstva vrstiev grafénu použitých na vytvorenie povrchu uhlíkových nanorúrok, ktoré sú označované ako jednovrstvové a viacvrstvové uhlíkové nanorúrky. [10]

##### Jednovrstvové uhlíkové nanorúrky (SWCNT)

SWCNT pozostáva z jedného grafitového plátu zrolovaného do valcovitej rúrky. Pri pohľade normálou k osi trubice sa vytvorí

zoskupenie koncentrických trubíc. Vrstva grafénu má priemer v rozmedzí 0,4 - 5 nm. Rôzny počet vrstiev uhlíka, umožňujú diverzitu vlastností. SWCNT sú vhodné napr. pre elektronické zariadenia, senzory a vysielacie poľa.

##### Viacvrstvové uhlíkové nanorúrky (MWCNT)

Viacvrstvové uhlíkové nanorúrky sú analogicky podobné uhlíkovým nanovláknam (CNF). Vo všeobecnosti sú však CNF odlišné na základe usporiadania grafénovej roviny. Ak je grafénová rovina a vlákno rovnobežné, štruktúra je považovaná za CNT a naopak ak k danému usporiadaniu nedôjde, je definovaná ako CNF. Vo viacvrstvových nanorúrkach sa vzdialenosť vrstiev grafénu pohybuje v intervale 0,34 až 0,39 nm. Vonkajší priemer daných nanorúrok dosahuje až 100 nm, pričom vnútorný priemer dosahuje približne len 2 nm. Použitie MWCNT je vhodné prevažne na mechanické aplikácie. [11]

##### Syntéza

Keďže sa CNT líšia svojimi vlastnosťami, líšia sa aj techniky syntézy. Výroba MWCNT je jednoduchšia v porovnaní s SWCNT, ktoré si vyžadujú kontrolovaný rast a osobitné atmosférické podmienky, čo vedie k ťažkostiam pri syntéze. Na výrobu vysokokvalitných CNT podľa požiadaviek výskumu sa vyvíja niekoľko metód, ako je metóda oblúkového výboja, chemickej depozície z pár (CVD) a metóda laserovej ablácie.

- CVD je najčastejšie využívanou metódou syntézy CNT v priemyselnej výrobe. Jej výhodou je využitie zdrojových látok uhlíka v plynenej podobe. Na reguláciu tlaku a dávkovanie sú síce kladené vyššie nároky, avšak táto metóda umožňuje vznik homogénnejších fáz s menším percentuálnym obsahom neželaných zložiek. V jednovrstvových a viacvrstvových nanorúrkach je dosiahnutá výrazne vyššia čistota. Zároveň je umožnená lepšia kontrola vlastností syntetizovaných nanorúrok a to najmä tvaru a rozmerov.
- Metóda oblúkového výboja je najstaršou metódou. Jej primárne vyvinutie bolo na syntézu fullerénov. Využíva vysokú teplotu (> 3 000 °C) na odparovanie atómov uhlíka do plazmy, čím sa vytvárajú SWCNT alebo MWCNT v závislosti od atmosférických podmienok. Výsledkom danej syntézy sú značne znečistené CNT s nežiadúcimi vedľajšími produktami, ktorých oddelenie je náročné niekedy až nemožné.
- Metóda laserovej ablácie pozostáva z procesu vyparovania atómov uhlíka. Zahriatím uhlíku na 1200 °C a súčasným namierením laserového lúča na daný materiál dôjde k vyparovaniu. Reakčná atmosféra je tvorená héliom alebo plynným argónom. Tieto plyny prepravujú atómy uhlíka na medený kolektor chladený vodou. Práve v kolektore dochádza k ich usadzovaniu. V prípade, že zdrojový materiál je tvorený čisto uhlíkom, prednostne vznikajú MWCNT. Pre syntézu SWCNT je potrebné využitie zmesi katalyticky aktívneho kovu a uhlíka. [12]

##### 3.1.2. Nanovlákná

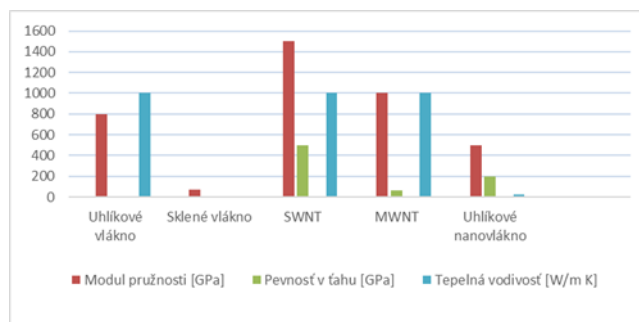
Nanovlákná sa tradične definujú ako valcové štruktúry s vonkajším priemerom pod 1 000 nm a pomerom strán väčším ako 50nm. Pričom pomer strán je pomer medzi dĺžkou a šírkou.

Prevažne sa výskumy venujú nanovláknam na báze uhlíka alebo polyméru.

Uhlíkové nanovlákná (CNF) sú trojrozmerné grafénové nanoštruktúry valcovitého tvaru, ktoré majú tvar kužeľa alebo valca. Je tvorený paralelným usporiadaním grafénových vrstiev pozdĺž pozdĺžnej osi. Disponujú výnimočne dobrými mechanickými a fyzikálnymi vlastnosťami. Rozhodujúcim faktorom pri zachovaní a zlepšení vlastností CNF je dosiahnutie dokonale vyrovnanej grafickej štruktúry. Tá sa zvyčajne dosahuje následnou grafitizáciou pri vysokej teplote (< 2400 °C) počas syntézy a spracovania CNF. Pričom grafitizácia je proces zahrievania amorfného uhlíka počas dlhšieho časového obdobia, pri ktorom sa zmení usporiadanie atómovej štruktúry, aby sa dosiahla usporiadaná kryštalická stavba. CNF sú pevnejšie, pružnejšie a ľahšie ako oceľ. Vedú teplo a elektrinu lepšie ako kovy. Charakteristické vlastnosti, ako je vysoký povrch, pórovitosť, pružnosť a vyššia mechanická pevnosť umožňujú využitie CNF v rôznych oblastiach. [13]

### 3.2. Komparácia materiálov výstuže kompozitu

Výber vhodného materiálu na spevnenie matrice je kľúčový z hľadiska požadovanej aplikácie. Nanomateriály prinášajú do kompozitu mnoho vylepšených vlastností ako tepelnú a elektrickú vodivosť ale aj vyššiu pevnosť v ťahu, čím sa stáva odolnejším proti poškodeniu.



Graf 1 – Najznámejšie typy výstuže

V grafe sú zobrazené najznámejšie typy výstuže pričom zobrazené údaje predstavujú najvyššie možné hodnoty. Tie sa môžu líšiť na základe spôsobu výroby materiálov. Z grafu jednotlivých vlastností materiálov používaných ako výstuž je zrejmé, že jednovrstvové uhlíkové nanorúrky disponujú najvyššími hodnotami v oblasti pružnosti a to s maximom až 1500 GPa. Dosahujú aj vysokú tepelnú vodivosť. Maximálna dosiahnutá tepelná vodivosť SWNT, MWNT a uhlíkových vlákien predstavuje 1000 W/m K. Vďaka tejto vlastnosti sú oba deriváty CNT vhodným materiálom na protinámrazovú ochranu. Dôvodom horších vlastností nanovláknien oproti CNT je ich povrch, ktorý je oveľa väčší ako pri nanorúrkach. Avšak oproti klasickým uhlíkovým vláknam dosahujú výrazne vyššiu pevnosť v ťahu, až 200 GPa. SWNT dosahuje najpriaznivejšie hodnoty, avšak sú výrazne drahšie a aj náročnejšie na výrobu. Z týchto dôvodov je možné povedať, že najperspektívnejším nanomateriálom je MWNT. Dosahuje výrazne vyššie hodnoty pevnosti v ťahu (60 GPa) oproti spomenutým materiálom a porovnateľné výsledky s SWNT v testoch pružnosti ako aj tepelnej vodivosti.

Čo sa týka elektrickej vodivosti daných materiálov, SWNT a MWNT predstavujú najlepšie elektrické vodiče s maximálnou hodnotou 10 000 S/cm. Uhlíkové nanovlákná dosahujú až 1000 S/cm, čo je v porovnaní s vodivosťou uhlíkových vlákien stonásobok. Schopnosti elektrického vodiča predstavujú pre nanomateriály možnosť širšieho spektra aplikácií. Sklené vlákna sú elektrickým izolantom. [14]

### 3.3. Využitie nanomateriálov v konštrukcii lietadiel

Nanomateriály sú v konštrukciách dopravných lietadiel novým pojmom, nakoľko sa v súčasnosti jedná zatiaľ iba o ich výskum. Existuje malé množstvo lietadiel, ktorých konštrukčné celky obsahujú nanomateriály.

#### 3.3.1. Protekcia voči poškodeniu

Nanomateriály majú potenciál chrániť lietadlá pred nepriaznivými vplyvmi počasia a pred mnohými rôznymi faktormi, ktoré môžu na lietadlo počas letu pôsobiť. Táto ochrana sa môže realizovať buď integráciou nanomateriálov do kompozitnej štruktúry hlavného rámu lietadla, alebo ako ochranná bariérová vrstva na povrchu lietadla, ktorá umožňuje buď priame blokovanie, alebo rozptýlenie vonkajšieho nebezpečenstva.

Príkladom vonkajšieho nebezpečenstva, ktoré môže ovplyvniť lietadlo, je blesk. Lietadlá sú neustále vystavené riziku úderu blesku, najmä do krídel. Ak sa energia účinne neodvedie, môže spôsobiť vážne poškodenie konštrukcie lietadla. Pokrytím alebo integráciou vysoko vodivých nanomateriálov, ako je napríklad grafén, do krídel lietadla, možno dosiahnuť elektrický rozptyl energie z úderu blesku. V mnohých lietadlách sa na rozptýlenie blesku používajú ťažké kovové konštrukcie. Nanomateriály ponúkajú potenciál na vytvorenie ľahkých vodivých kompozitov, ktoré by mohli účinne nahradiť kovový systém konštrukcie.

#### 3.3.2. Nanonanátery

Aplikácia nanotechnológií v náteroch zaznamenala v posledných dvoch desaťročiach výnimočný rast. Pozoruhodný vývoj je výsledkom zvýšenej dostupnosti nanomateriálov, ako sú nanočastice a uhlíkové nanorúrky. Ďalším dôvodom rozvoja je pokrok v procesoch nanášania umožňujúcich kontrolu štruktúry povrchových náterov na nanoúrovni. Nanovrstvy sú zvyčajne jednofázové alebo viacfázové pevné štruktúry nanosené na neporušený povrch s hrúbkou približne 100 nm alebo menej, ktoré pridávajú materiálu substrátu špecifickú vlastnosť alebo funkciu.

Bežné vlastnosti, ako je teplota tavenia, elektrická vodivosť, magnetická priepustnosť, hydrofóbnosť a chemická reaktivita, silne závisia od veľkosti častíc materiálu. Medzi hlavné priemyselné aplikácie nanonáterov patrí ochrana proti korózii, povlaky odolné proti opotrebovaniu, tepelná ochrana a samočistiace (nepriľnavé) povrchy. Takéto aplikácie sú obzvlášť dôležité pre letecký priemysel, pretože umožňujú modifikáciu rámov lietadiel, interiérov a komponentov motorov s cieľom zlepšiť výkon, zvýšiť palivovú účinnosť a znížiť prevádzkové náklady.

### Protektcia proti námraze

Na prekonanie problémov s námrazou existuje niekoľko techník vrátane protinámrazových náterov a tepelných izolátorov, ktoré by mohli byť použité na povrchoch. Pridanie tepelného izolátora by však mohlo viesť k zvýšeniu hmotnosti, čo by mohlo znížiť účinnosť lietadla. Na základe požiadaviek boli vyvinuté samozahrievacie kompozity vystužené CNT, ktoré poskytujú elektrický ohrev pri nízkej teplote okolia. Tenké laminované pásy na báze MWCNT pôsobia ako elektroteplné vyhrievanie na ochranu proti námraze, kde je štruktúra pásu zarovnaná so zanedbateľným prírastkom hmotnosti. [15]

### Hydrofóbné nátery

Testovanie počas letu na lietadle Airbus A320 spoločnosti British Airways preukázalo 20 - 40 % zlepšenie hydrofóbnosti povrchu pri použití nanonáterov v porovnaní s inými komerčne dostupnými konvenčnými nátermi. Inovatívne nátery na báze nano uhlíkových materiálov (ako sú uhlíkové nanorúrky a oxid grafénu) zároveň znižujú odpor vetra na povrchu lietadla, čím znižujú spotrebu paliva a emisie CO<sub>2</sub>.

### Znižovanie odporu

Vývoj nových metód na zníženie pasívneho odporu vzduchu v letectve je jedným z najaktuálnejších prístupov na zníženie spotreby paliva, emisií CO<sub>2</sub> a hluku lietadiel. Jeden z najslubnejších systémov na pasívne zníženie odporu vzduchu v lietadlách novej generácie predstavujú rebrované povrchy pozostávajúce z veľmi malých (2 - 100 mikróvov) paralelných drážok.

Projekt ReSiSTant (Large Riblet Surface with Super Hardness, Mechanical and Temperature Resistance by nanofunctionalization) financovaný z programu EÚ je zameraný na vývoj pokročilých nanovrstiev a metód nanášania, ktoré zvýšia výkonnosť rebrovania v náročných podmienkach zabezpečením odolnosti voči oderu a korózii.

### 3.3.3. Zmierňovanie buffetingu

Vysoká účinnosť tlmenia CNT umožňuje ich použitie v konštrukcii, najmä na chvoste lietadla, na zmiernenie buffetingu. Experimenty naznačujú až 200% zvýšenie úrovne tlmenia. [15]

## **4. ZÁVER**

Hlavným cieľom práce je prieskum možných implementácií progresívnych materiálov, konkrétne nanokompozitov, na základe ich špecifických vlastností. Prvá časť predstavuje charakterizovanie samotných kompozitných materiálov a priblíženie ich aplikácie už v existujúcich konštrukčných častiach. Hlbší rozbor kompozitných materiálov a porozumenie ich vlastnostiam a rozdeleniu na základe jednotlivých kritérií je kľúčový pre následnú analýzu zaoberajúcu sa ich vylepšením nanotechnológiou a využitím. Analyzovanie možností implementácie skúmaných prvkov je vo fáze spracovania a naďalej preverovaná.

Na základe zistených poznatkov o vlastnostiach nanomateriálov, by ďalšie možné využitie mohla predstavovať ich implementácia do brzdoých kotúčov, konkrétne MWNT do uhlíkovej matrice vystuženej uhlíkovými vláknami. Vysoká tepelná odolnosť

MWNT a odolnosť voči poškodeniu, by teoreticky mohla predĺžiť životnosť brzd. Následne je možné uvažovať o znížení nákladov na údržbu a opravu.

### **Podakovanie**

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu **313011ATR9** "Výskum a vývoj využiteľnosti autonómnych lietajúcich prostriedkov v boji proti pandémie spôsobenej COVID-19".

### **Referencie**

- [1] KRIZBERGS, J. a kol. 2016. *Kompozitné materiály* [online]. [cit.2023-02-18]. Dostupné z:
- [2] <https://zep.sk/wp-content/uploads/2017/11/SKILLM21.pdf>
- [3] KOBLEN, I. a SZABO, S. 2017. *Manažment životného cyklu leteckej techniky II.* [online]. [cit.2023-02-18] Dostupné z:
- [4] [https://www.researchgate.net/profile/Stanislav-Szabo/publication/320336164\\_Manazment\\_zivotneho\\_cyklu\\_leteckej\\_techiky\\_II/links/59de93e1458515376b29e676/Manazment-zivotneho-cyklu-leteckej-techniky-II.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Stanislav-Szabo/publication/320336164_Manazment_zivotneho_cyklu_leteckej_techiky_II/links/59de93e1458515376b29e676/Manazment-zivotneho-cyklu-leteckej-techniky-II.pdf)
- [5] CÍGER, A. 2022. *Kompozitové materiály: Budúcnosť letectva?*. [online]. [cit.2023-02-18]. Dostupné na:
- [6] <https://www.brokerske-centrum.uniza.sk/doc/Ciger-II.pdf>
- [7] PARVEEZ, B. a kol. 2022. *Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review.* [online]. [cit.2023-02-26]. Dostupné na:
- [8] <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/22/5007>
- [9] ERDEN, S. a HO, K. 2017. *Fiber reinforced composites.* [online]. [cit.2023-02-26]. Dostupné na:
- [10] <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/fiber-reinforced-composite>
- [11] QUILTER, A. 2004. *Composites in Aerospace Applications.* [online]. [cit.2023-03-02]. Dostupné na:
- [12] <https://www.aviationpros.com/engines-components/aircraft-airframe-accessories/article/10386441/composites-in-aerospace-applications>
- [13] NEDELUCU, R. a REDON, P. 2012. *Composites material materials for aviation industry.* [online]. [cit.2023-03-02]. Dostupné na:
- [14] [https://www.afahc.ro/ro/afases/2012/air\\_force/Nedelcu\\_Redon.pdf](https://www.afahc.ro/ro/afases/2012/air_force/Nedelcu_Redon.pdf)
- [15] KHANNA, A. 2019. *NanoTechnology In Aerospace.* [online]. [cit.2023-03-10]. Dostupné na:
- [16] [https://www.academia.edu/6781200/NANOTECHNOLOGY\\_IN\\_AEROSPACE?fbclid=IwAR1YNdUv3Q9NPYUsIDMyTzKNwCJHEkxUiat\\_IPn6XxE-Ji33sQtI0Tmjv5U](https://www.academia.edu/6781200/NANOTECHNOLOGY_IN_AEROSPACE?fbclid=IwAR1YNdUv3Q9NPYUsIDMyTzKNwCJHEkxUiat_IPn6XxE-Ji33sQtI0Tmjv5U)

- [17] RANA, S. a FANGUEIRO, R. 2016. *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering: Processing, Properties and Applications*. [online]. [cit.2023-03-10]. Dostupné na:
- [18] <https://books.google.sk/books?id=QauSBgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=sk#v=onepage&q&f=false>
- [19] RAMACHANDRAN, K. a kol. 2021. *Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)-reinforced ceramic nanocomposites for aerospace applications: a review*. [online]. [cit.2023-03-10]. Dostupné na:
- [20] <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-021-06760-x>
- [21] JESENÁK, K. a kol. 2018. *Nanokompozity na báze uhľíkových nanorúrok a vybraných silikátových minerálov*. [online]. [cit.2023-03-12]. Dostupné na:
- [22] <https://fns.uniba.sk/fileadmin/prif/chem/kag/Zam-Jesenak/2018/nanokompozity2018.pdf>
- [23] VASILEV, C. 2021. *Applying Nanocoatings to Aviation: A Review*. [online]. [cit.2023-03-22]. Dostupné na:
- [24] [https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=5843&fbclid=IwAR3rLQGoFd6v2Lwfwu5I3IX1VlxPw4Olmh\\_KyCPMYO322VxWInUpuwO\\_rM8](https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=5843&fbclid=IwAR3rLQGoFd6v2Lwfwu5I3IX1VlxPw4Olmh_KyCPMYO322VxWInUpuwO_rM8)
- [25] HARDYAL, K. 2020. WHAT IS GRAPHITIZATION? [online]. METCAR. [cit. 2023-20-03]. Dostupné na: <https://blog.metcar.com/what-is-graphitization>
- [26] GOHARDANI, O. – ELOLA, M. C. – ELIZATXEA, C. 2014. Potential and prospective implementation of carbon nanotubes on next generation aircraft and space vehicles: A review. In: *Progress in Aerospace Sciences* [online]. 2014, roč. 70, č. 3, s. 42-68. [cit. 2023-21-03]. ISSN 0376-0421. Dostupné na:
- [27] [https://www.academia.edu/14361897/Potential\\_and\\_prospective\\_implementation\\_of\\_carbon\\_nanotubes\\_on\\_next\\_generation\\_aircraft\\_and\\_space\\_vehicles\\_A\\_review\\_of\\_current\\_and\\_expected\\_applications\\_in\\_aerospace\\_sciences](https://www.academia.edu/14361897/Potential_and_prospective_implementation_of_carbon_nanotubes_on_next_generation_aircraft_and_space_vehicles_A_review_of_current_and_expected_applications_in_aerospace_sciences)
- [28] ZUAN, J. a kol. 2012. *Buffeting mitigation using carbon nanotube composites: A feasibility study*. [online]. [cit.2023-03-24]. Dostupné na: [https://www.researchgate.net/publication/235672705\\_Buffeting\\_mitigation\\_using\\_carbon\\_nanotube\\_composites\\_A\\_feasibility\\_study](https://www.researchgate.net/publication/235672705_Buffeting_mitigation_using_carbon_nanotube_composites_A_feasibility_study)