Primjena kompozitnih materijala u zrakoplovnim konstrukcijama

Meić-Sidić, Antun

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:819289

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Antun Meić Sidić

PRIMJENA KOMPOZITNIH MATERIJALA U ZRAKOPLOVNIM KONSTRUKCIJAMA

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2015.

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

PRIMJENA KOMPOZITNIH MATERIJALA U ZRAKOPLOVNIM KONSTRUKCIJAMA

USE OF COMPOSITE MATERIALS IN AIRCRAFT CONSTRUCTION

Mentor: doc. dr. sc. Andrija Vidović

Student: Antun Meić Sidić, 0135230764

Zagreb, rujan 2015.

PRIMJENA KOMPOZITNIH MATERIJALA U ZRAKOPLOVNIM KONSTRUKCIJAMA

SAŽETAK

Primjena kompozitnih materijala u zrakoplovnim konstrukcijama ističe se u raznim vrstama i kombinacijama kompozitnih materijala. Svaka vrsta zasebno ima svoje prednosti i svojstva koja ju obilježavaju te također tim istim svojstvima konkuriraju dosadašnjim konvencionalnim materijalima. U izradi strukturalnih elemenata zrakoplova kompozitni materijali omogućuju proizvodnju kompleksnih struktura i oblika, a zatim i vrlo visoke performanse tih elemenata. Upravo tim naprednim svojstvima hibridnih kompozitnih materijala omogućuje se razvoj i proizvodnja zrakoplova vrlo visokih performansi, male težine, učinkovitijih i sigurnijih zrakoplova. Danas su u zrakoplovnim konstrukcijama sve više zastupljeni kompozitni materijali. Buduća tehnologija proizvodnje kompozitnih materijala uz popraćenu standardizaciju pruža automatizirane procese proizvodnje koji svojom tehnologijom smanjuju cijene izgradnje zrakoplova kompozitnih konstrukcija. Primjer primjene kompozitnih materijala tvrtke Pipistrel na svojim zrakoplovima pokazuje sve prednosti te vrste materijala u razvoju i proizvodnji najefikasnijih i najsigurnijih zrakoplova.

KLJUČNE RIJEČI:

kompozitni materijali; konstrukcija zrakoplova; vlakna; strukturalni elementi;Pipistrel

USE OF COMPOSITE MATERIALS IN ARICRAFT CONSTRUCTION

SUMMARY

The use of composite materials in aircraft construction is characterized by a variety of types and combinations. Each type separately is characterized by its own advantages and performances and these performances rival those of present conventional materials. In the production of aircrafts structural elements, composite materials enable the production of complex structures and forms with very high performance. These advanced properties of hybrid composite materials allow the development and production of more efficient and safer aircrafts, with very high performance and low weight. In present aircraft structures, composite materials are being used more and more. The future composite materials technology, along with the accompanying standardization, provides automated manufacturing processes whose technology reduces the cost of manufacturing composite aircraft structures. An example provided by the Pipistrelcompany which used composite materials on their aircrafts shows the advantages of this kind of material in the development and production of the most efficient and safest aircrafts.

KEY WORDS:

composite materials; aircraft construction;fibers; structural elements;Pipistrel

SADRŽAJ

1. Uvod 1
2. Općenito o kompozitnim materijalima 4
2.1.Kompozitni materijali 4
2.2. Vlaknima ojačani kompoziti 5
2.3. Kompoziti s česticama 6
2.4. Slojeviti kompoziti 6
2.5. Strukturni kompoziti 7
3. Prednosti i nedostaci kompozitnih materijala 9
3.1. Prednosti 9
3.2. Nedostaci 11
4. Primjena kompozitnih materijala pri izradi strukturalnih elemenata zrakoplova 12
4.1. Primjena na komercijalnim zrakoplovima 13
4.2. Primjena na helikopterima 16
4.3. Održavanje i pregled kompozitnih konstrukcija 17
5. Zahtjevi plovidbenosti zrakoplova izrađenih od kompozitnih materijala 19
5.1. Europski propisi za plovidbenost 19
5.2. Američki propisi za plovidbenost 21
6. Zrakoplovi tvrtke Pipistrel i primjena kompozitnih materijala 24
7. Zaključak 30
LITERATURA 32
POPIS SLIKA 33
POPIS TABLICA 33

1. Uvod

Kompozitni materijali zastupljeni su u mnogim granama industrije, te udio primjene te vrste materijala sve više raste u sustavima koji nas okružuju. Prve pojave kompozitnih materijala bile su izgrađene od smjese koja je povezivala materijal veće čvrstoće. Jedan od najstarijih kompozitnih materijala je armirani beton koji se zbog svojih svojstava primjenom novih tehnologija koristi i danas. Beton kao zasebni materijal je relativno krut i tvrd materijal te se kombinacijom njega i željezne mrežaste konstrukcije koja je elastična dobiva materijal koji ima svojstva oba materijala.

Zrakoplovi su od svojih najranijih letova prvenstveno ovisili o težini te su materijali za izradu zrakoplova morali zadovoljiti što bolji omjer mehaničkih svojstava i težine materijala. Nakon raznolikih primjena lakih metala u konstrukcijama zrakoplova, kompozitni materijali bili postajali su vrlo konkurentni konvencionalnim te se sve više ulagalo u razvoj istih. U zrakoplovnoj industriji veće primjene kompozitnih materijala bile su zastupljene tijekom 2. svjetskog rata za izradu elemenata borbenih zrakoplova.

Primjena kompozitnih materijala postala je vrlo važna u zrakoplovnim konstrukcijama. Zbog uštede na težini, 1960-ih godina razvijeni su dijelovi zrakoplova kao što su oplata i upravljačke površine izgrađeni od aluminijske konstrukcije zatvorene kompozitnom oplatom. Zbog vrlo visoke cijene razvoja i proizvodnje kompozitnih materijala, primjena u civilnom zrakoplovstvu dogodila se nešto kasnije. Konstantni rast cijena goriva na svjetskom tržištu dodatno su potaknule inženjere zrakoplovne industrije na razvoj modernijih i ekonomičnijih zrakoplova. A to se upravo postizalo primjenom modernijih lakših i konkurentnijih materijala kao što su kompoziti. Masovnom upotrebom kompozitnih materijala ulagalo se u razvoj boljih i jeftinijih tehnologija za proizvodnju te vrste materijala. Novije generacije zrakoplova u cijelosti su konstruirane od kompozitnog trupa zrakoplova te struktura krila, što omogućuje visoke performanse zrakoplova, kao što su učinkovitost, sigurnost, ekološka prihvatljivost i efikasnost[1].

[1] http://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/composites/Composites_Overview.htm

Svrha ovog završnog rada je istraživanje primjene kompozitnih materijala u zrakoplovnim konstrukcijama, te kreiranje studije primjene kompozitnih materijala na zrakoplovima tvrtke Pipistrel. U radu su opisane razne podvrste kompozitnih materijala i njihova svojstva, istraženi potrebni zahtjevi za certificiranje plovidbenosti zrakoplovnih konstrukcija izgrađenih od kompozitnih materijala.

Cilj završnog rada je prikazati prednosti i nedostatke pojedinih vrsta kompozitnih materijala te usporediti ih sa konvencionalnim materijalima koji se primjenjuju u zrakoplovnoj industriji, te ukazati na problematiku koja se javlja u eksploataciji zrakoplovnih konstrukcija izgrađenih od kompozitnih materijala.

Završni rad je sadržajno koncipiran u sedam poglavlja:

1. Uvod
2. Općenito o kompozitnim materijalima
3. Prednosti i nedostaci kompozitnih materijala
4. Primjena kompozitnih materijala pri izradi strukturalnih elemenata zrakoplova
5. Zahtjevi plovidbenosti zrakoplova izrađenih od kompozitnih materijala
6. Zrakoplovi tvrtke Pipistrel i primjena kompozitnih materijala
7. Zaključak

U uvodnom djelu predstavljen je povijesni razvoj primjene kompozitnih materijala, definirana je svrha i cilj rada te je prikazana struktura rada.

Drugo poglavlje prikazuje kompozitne materijale kao i njihov sastav i svojstva, daje podjelu na podvrste kompozitnih materijala od kojih je svaka dodatno opisana.

U trećem poglavlju prikazanaje usporedba kompozitnih i konvencionalnih materijala kao i prednosti i nedostaci kompozitnih u odnosu na ostale konvencionalne materijale.

Četvrto poglavlje odnosi se na primjenu kompozitnih materijala pri izradi strukturalnih elemenata zrakoplova. Opisuje se proces izrade kompozitnih proizvoda i ukazuje na čimbenike o kojima treba voditi brigu pri odabiru materijala u zrakoplovnim konstrukcijama. U ovom je poglavlju kroz nekoliko primjera komercijalnih zrakoplova opisan razvoj primjene kompozita te su posebno opisani segmenti primjene određenih vrsta kompozitnih materijala. Također jedna od podtema ovog poglavlja je održavanje i pregled kompozitnih konstrukcija u kojoj je razrađena cijela procedura ispitivanja te je ukazano na moguće nepravilnosti istih.

U petom poglavlju, zahtjevi plovidbenosti zrakoplova izrađenih od kompozitnih materijala, opisani su zakoni i regulative Savezne uprave zrakoplovstva kao i propisi certificiranja plovidbenosti konstrukcija zrakoplova. Ukazuje se i na procese ispitivanja koji su neizbježni u izdavanju plovidbenosti te norme koje se moraju zadovoljiti svim segmentima zrakoplovne industrije. Također su propisani standardi koji moraju biti udovoljeni od Europske agencije za civilno zrakoplovstvo u izdržljivosti i otpornosti strukture zrakoplova izrađenih od kompozitnih materijala.

U šestom poglavlju, zrakoplovi tvrtke Pipistrel i primjena kompozitnih materijala, kreirana je studija slučaja primjene kompozitnih materijala pri konstruiranju zrakoplova.

U posljednjem, zaključnom djelu, predstavljena je sinteza svih postignutih zaključnih razmatranja o primjeni kompozitnih materijala u zrakoplovnoj industriji. Objašnjen je značaj razvoja suvremenih materijala u zrakoplovnoj industriji, te značaj tehnološkog razvoja kao temelj proizvodnje suvremenih, sigurnijih, učinkovitijih i ekološki prihvatljivih zrakoplova.

2. Općenito o kompozitnim materijalima

2.1.Kompozitni materijali

Kompoziti predstavljaju materijale koji nastaju spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava u cilju dobivanja materijala poboljšanih svojstava kakva ne posjeduje ni jedan materijal zasebno. Svaki kompozitni materijal u osnovi se sastoji od matričnog materijala i ojačala koji su međusobno povezani.

Osnovna zadaća matrice je povezivanje ojačala kako bi se opterećenje prenosilo na ojačala te zaštićuje ojačala od okolnih kemijskih i mehaničkih utjecaja i oštećenja. Zahtjeva se da materijali matrice budu žilavi i duktilni kako bi se opterećenje prenosilo na ojačala, te spriječili slabljenje kompozita gdje je ojačalo prekinuto.Uloga ojačala u kompozitu je visok modul elastičnosti – krutost, otpornost kompozita na trošenje, toplinska vodljivost te visoka čvrstoća kompozita.Ukupno ponašanje kompozitnih materijala ovisi o svojstvima materijala matrice i ojačala, veličini, raspodjeli, obliku i volumnom udjelu ojačala u kompozitu.

Prema vrsti materijala matrica se dijeli na:

- polimernu (polimerni kompozit – PMC)
- metalnu (metalni kompozit – MMC)
- keramičku (keramički kompozit – CMC)

U upotrebi je najčešća polimerna matrica te može biti ojačana vlaknima kao što su aramidna, staklena ili ugljična. Prednost metalnih kompozita je visoka radna temperatura materijala za razliku od polimernih kompozita, dok su keramički kompoziti usmjereni na otpornost na nagla širenja napuklina (lomna žilavost).[2]

Kompozitni materijali dijele se na:

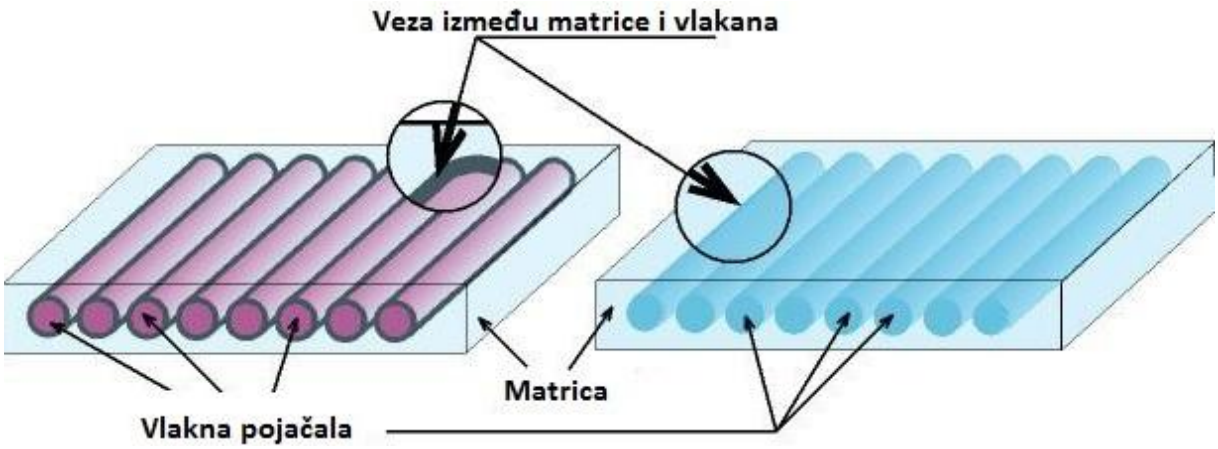
- kompoziti s česticama
- vlaknima ojačani kompoziti
- slojeviti kompoziti
- strukturni kompoziti (sendvič konstrukcije)

[2]Filetin, T., Kovačiček, F., Indorf, J.: *Svojstva i primjena materijala,* FSB, Zagreb, 2002., str. 187-188

2.2. Vlaknima ojačani kompoziti

Vlaknima ojačani kompoziti sastoje se od matrice i ojačala uglavnom vlaknastog oblika (slika 1). Sadrže vlakna relativno visoke krutosti i čvrstoće koja su povezana sa žilavom i duktilnom smolom. Ovisno o rasporedu vlakana variraju svojstva kompozita. Za vlakna u izradi kompozita danas se koriste raznolike vrste vlakana kao što su staklena, ugljična ili aramidna vlakna. Svojstva staklenih vlakana kao što su mehanička i tehnička svojstva,mala težina, nezapaljivost i ograničenost prema gorivosti pogodna su za uporabu kompozita u zrakoplovstvu. Ugljična vlakna najčešće predstavljaju ojačanje polimernih kompozita visokom specifičnom čvrstoćom i krutošću, visokim modulom elastičnosti te otpornošću na visoke temperature. S najvišom specifičnom čvrstoćom od svih komercijalno dostupnih ojačala aramidna vlakna su također jako zastupljena u primjeni u zrakoplovstvu.[3]

Uz ove vlaknaste materijale kao ojačalo kompozita koriste se i borna vlakna koja su izrazite tvrdoće te se uglavnom koriste u zrakoplovnoj industriji kao jeftiniji materijal od kompozita s ugljičnim vlaknima. Uz borna vlakna u uporabi su i sicilij-karbidna vlakna najčešće korištena za ojačavanje oplata na zrakoplovima koja su izrađena od titanskih i aluminijskih materijala.[4]



Slika 1. Prikaz kompozita ojačanih vlaknima

Izvor: http://mohan.mse.gatech.edu/Research/stereocomplex_fiber/fig2.JPG

[3]Hull, D., Clyne, T. W.: *AnIntroduction to Composite Materials,* CambrigeUniversityPress 1996., str. 9-17
[4]Smojver, I.: *Mehanika kompozitnih materijala,* FSB, Zagreb, 06/2007., str. 5-8

Kako bi se izradio proizvod od kompozita s vlaknima željenih karakteristika potrebno je uzeti u obzir duljinu i promjer vlakana koji se ugrađuju u matricu. Također važan je i volumni udio vlakana u kompozitu, veći volumni udio dovodi kompozit do veće čvrstoće i krutosti. Jedan od važnih utjecaja je usmjerenost vlakana u kompozitu, svojstva kompozita mogu biti vrlo anizotropna ovisno o kutu usmjerenja vlakana u odnosu na djelovanje opterećenja. Međutim, karakteristike kompozita ovise i o svojstvima vlakana, tj. njihovoj specifičnoj čvrstoći, krutosti i specifičnom modulu elastičnosti.[5]

Također su zastupljeni i hibridni kompoziti koji se sastoje od više vrsta vlakana kao ojačala. Zbog vrlo velikog broja kombinacija vlakana i slaganja vlakana u matrici hibridni kompoziti imaju veliku prednost pred kompozitima sa zasebnim ojačalima. Česta kombinacija su ugljična i staklena vlakna u polimernoj matrici, zbog svojstava ugljičnih vlakana vrlo visoke čvrstoće i krutosti te elastičnosti staklenih vlakana ovaj kompozit primjenjuje se za posebno projektirane elemente zrakoplovne konstrukcije.

2.3. Kompoziti s česticama

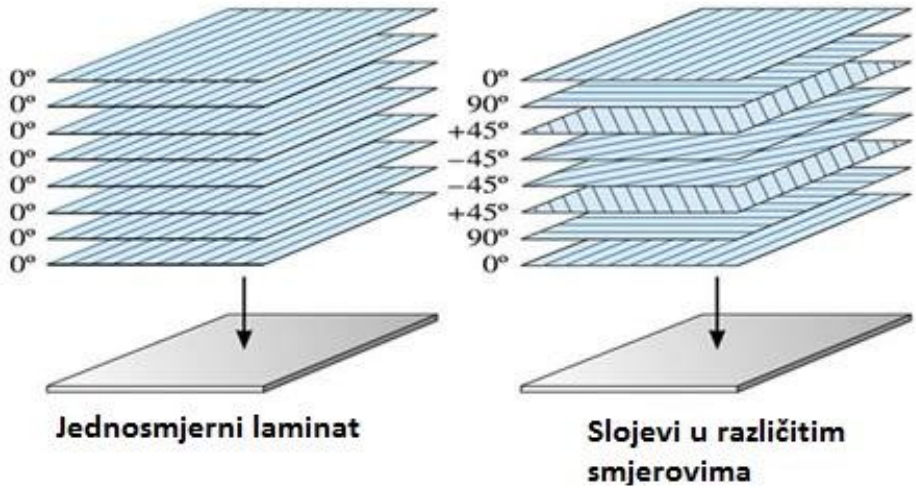
U kompozitima s česticama kao ojačalo koriste se čestice od tvrdog i krhkog materijala koje su jednoliko raspoređene u matrici. Za razliku od kompozita s vlaknima, svojstva kompozita s česticama jednaka su u svim smjerovima, a svojstva kompozita ovise o promjeru čestica u kompozitu. Također kompoziti s česticama mogu se izrađivati od raznih kombinacija polimera, metala i keramike, ovisno o konačnim željenim svojstvima kompozita.

2.4. Slojeviti kompoziti

Slojeviti kompoziti ili laminirani kompoziti sastoje se od više slojeva ojačala povezanih u matrici (slika 2). Slojevi osiguravaju najbolja svojstva u smjeru djelovanja opterećenja čime se ostvaruje smanjenje materijala a time i ušteda na težini što predstavlja veliku prednost u zrakoplovstvu.

[5] ibid

Slojevi su međusobno povezani čvrstim spojem, ovisno o orijentaciji ovisit će svojstva kompozitnog elementa. Slojeviti kompoziti mogu se naći u mnogim izvedbama među kojima su materijali tankih prevlaka te debljih zaštitnih slojeva, materijali galvanskih prevlaka, bimetali,itd. Jedan od razloga kreiranja takvih slojevitih kompozita je zaštita površine od agresivnih medija što je vrlo važno kod primjene u zrakoplovnoj industriji.



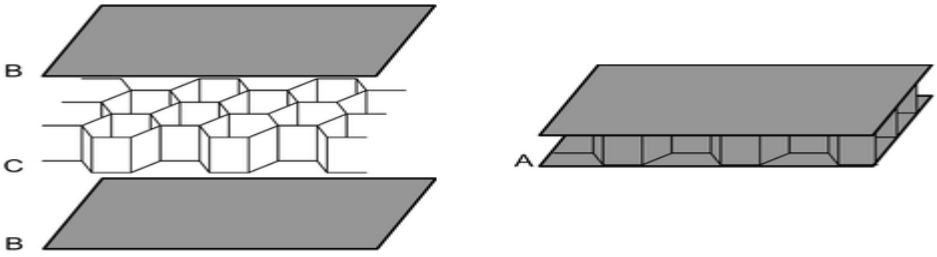
Slika 2. Prikaz slojevitog kompozita

Izvor: http://www.quartus.com/wp-content/uploads/ply_stacking.jpg

2.5. Strukturni kompoziti

Strukturni kompoziti (sendvič konstrukcije) sastoje se od dva kruta i čvrsta vanjska sloja koje povezuje materijal malih dimenzija koji čini jezgru konstrukcije. Ne ovise o svojstvima matrice već o geometrijskom rasporedu elemenata konstrukcije – jezgra preuzima tlačna opterećenja.

Jezgre strukturnog kompozita građene su od različitih materijala kao što su balzino drvo, sintetski kaučuk, pjenasti polimeri, anorganski cementi. često korištene jezgre izrađene su u obliku šesterokutne ćelije koja je svojom osi okomita na površinske slojeve (slika 3).



Slika 3. Prikaz strukturalnog kompozitnog materijala

Izvor : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/b2/CompositeSandwich.png/220px-CompositeSandwich.png

U zrakoplovstvu se također koriste kompoziti s matricom od metala kao što su superlegure na bazi nikla i kobalta, titan legure i lake aluminijske i magnezijske legure koje su prikladne u zrakoplovstvu. Uz takve kompozite još se koriste i kompoziti s keramičkom matricom posebno ojačanom česticama. Takvi kompoziti poznati su po velikoj mehaničkoj otpornosti na visokim temperaturama te na naglim promjenama temperatura.[6]

[6]. Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: *Zrakoplovna prijevozna sredstva 1*, FPZ, Zagreb, 2008., str. 152-156

3. Prednosti i nedostaci kompozitnih materijala

3.1. Prednosti

Kompozitni materijali imaju mnoge prednosti, uz vrlo malo težinu, povećanom dugotrajnošću, prilagodba na optimalni odnos čvrstoće i krutosti, otpornost na koroziju, smanjena cijena pri izradi kompleksnih elemenata. Mala težina kompozita veoma je važna u zrakoplovstvu, što je težina manja veća je učinkovitost utrošenog goriva, veći plaćeni teret i veći dolet. Velika sloboda prilagodbe raznim oblicima čini kompozite atraktivnim materijalima u zrakoplovstvu. Izvrsna izdržljivost kompozitnih materijala na umor kada se radi o dinamičkim opterećenjima. Kompozitni materijali ovisno o vrsti smole imaju visoku temperaturnu otpornost. Kompoziti imaju izvrsne značajke apsorbiranja radarskih zraka. Trupovi zrakoplova izrađeni od kompozitnih materijala omogućuju veće tlačno opterećenje. Kompozitni materijali su izrazito dugotrajni materijali što dokazuju pojedini primjeri koji su u uporabi i preko 50 godina.

Neke od općih prednosti kompozitnih materijala pred konvencionalnim materijalima su sljedeće:

- mogućnosti izrade vrlo složenih oblika,
- smanjenje troškova naknadne obrade dijelova,
- mogućnost spajanja dijelova tijekom samog postupka proizvodnje,
- dimenzijska stabilnost pri ekstremnim radnim uvjetima,
- otpornost na koroziju,
- održavanje, dugotrajnost.

Osnovna razlika kompozitnih materijala u usporedbi sa metalima je da oni imaju svojstva usmjerena ovisno o rasporedu ojačala unutar kompozita. Krajnji materijal se formira tijekom proizvodnje te u većini slučajeva u krajnjem obliku proizvoda. Vlaknasti materijali kao dio kompozita više su pogodni prilagodbi u usporedbi sa metalima, te je vrlo lako zadovoljiti potrebe izvedbe složenijih zahtjeva dizajna.

Kompozitni materijali mogu osigurati mnogo veći odnos čvrstoće i težine u odnosu na metale, u pojedinim slučajevima taj odnos je veći i do 20%. Specifična čvrstoća aramidnih i

ugljičnih vlakana ojačana epoksidnim smolama imaju 4 – 6 puta veću specifičnu čvrstoću od čelika ili aluminija (tablica 1). Kompoziti mogu biti izgrađeni s otpornošću u određenom smjeru, dok kod metala i drva to nije moguće.[7]

U odnosu na metale koji uslijed visokih opterećenja prolaze stalne deformacije prije nego dolazi do loma, kompoziti pokazuju malu ili nikakvu plastičnost. Velika otpornost ugljičnih i aramidnih kompozita na umor materijala u odnosu na metale. Uslijed termičkih djelovanja kompozitni materijali pokazuju puno veću otpornost pri djelovanju opterećenja u odnosu na konvencionalne materijale. U usporedbi s konvencionalnim materijalima kompoziti gotovo nemaju termičko širenje, te porastom temperature zadržavaju prvobitni oblik. Kompozitni materijali su lomljiviji od kovanih metala te su tako lakše izloženi oštećenju.

Tablica 1. Tablica mehaničkih svojstava materijala

Material	**Gustoća (10^3kg/m^3)**	**Vlačna čvrstoća (Mpa)**	**Tlačna čvrstoća (Gpa)**	**Specifična čvrstoća (Mpa/Kgm^{-3})**
E – staklena vlakna	2,08	1103	44,8	0,53
G – staklena vlakna	1,99	1931	51,7	0,97
Aramidna vlakna	1,38	1448	75,8	1,05
HMS Grafit	1,63	1172	206,8	0,72
Ugljična vlakna	1,55	1724	137,9	1,11
Aluminij	2,77	572	68,9	0,21
Titan	4,43	1103	113,8	0,25
Čelik	8,00	1379	200,0	0,17

Izvor:
http://3.bp.blogspot.com/_w2EkcRcsSqA/S7ECqMPrIzI/AAAAAAAAANs/X1yA3G6k2s0/s1600/composite+material+properties.JPG

[7] ibid

Kompozitni materijali nisu električki vodljivi što ih omogućuje pogodnim za elemente u doticaju s elektronikom, ukoliko je potrebno moguće je kompozite izraditi i vodljivima. Kompoziti koji ne sadrže metale su nemagnetični te mogu biti korišteni u okolini osjetljivih elektroničkih elemenata.

Kompozitni materijali u odnosu na konvencionalne su mnogo skuplji, što je važno uzeti u obzir prilikom planiranja projekta. Zahtijevaju mnogo kompleksniju strukturu sa aspekta mehaničkih svojstava što nije slučaj i kod struktura izrađenih od metala. Lomljiviji su od kovanih metala te su tako lakše izloženi oštećenju. Za razliku od proizvodnje konvencionalnih materijala, u proizvodnji kompozita proces izrade zahtjeva posebnu tehnologiju.

3.2. Nedostaci

Visoka cijena proizvodnje kompozitnih materijala, mnogo kontrolnih pregleda tijekom proizvodnje te mogućnost pojave proizvoda koji nisu za upotrebu. Kompozitni materijali zahtijevaju mnogo kompleksniju strukturu sa aspekta mehaničkih svojstava što nije slučaj i kod struktura izrađenih od metala.Kompozitni materijali su relativno krhki, te se problematika javlja prilikom popravka kompozita iz sljedećih razloga:

- materijali zahtijevaju poseban transport te skladištenje i imaju određen vijek trajanja
- vruće stvrdnjavanje materijala je neophodno uz odgovarajuću opremu
- zagrijavanje i stvrdnjavanje te hlađenje materijala uzima dosta vremena

Rad sa kompozitima može imati štetan utjecaj na zdravlje čovjeka i okoline. Nadalje, kompozitni materijali sa ugljičnim vlaknima električki su vodljivi te mogu reflektirati radio valove što u nekim slučajevima može biti nedostatak.Sa aspekta održavanja veliki nedostatak kompozitnih materijala je nevidljivost oštećenja strukture zrakoplova što stvara dodatne preglede odgovarajućom opremom. [8]

[8] http://www.premix.com/why-composites/adv-composites.php

4. Primjena kompozitnih materijala pri izradi strukturalnih elemenata zrakoplova

U konstruiranju zrakoplova tehničke karakteristike ovise o odabiru materijala za izradu pojedinih elemenata. Prilikom odabira materijala, javljaju se i pojedini zahtjevi koji trebaju biti ispunjeni prilikom uporabepojedine vrste materijala. Prilikom konstruiranja elemenata od velike važnosti je funkcionalnost elemenata ili cijele konstrukcije, te ponašanje materijala prilikom uporabe.

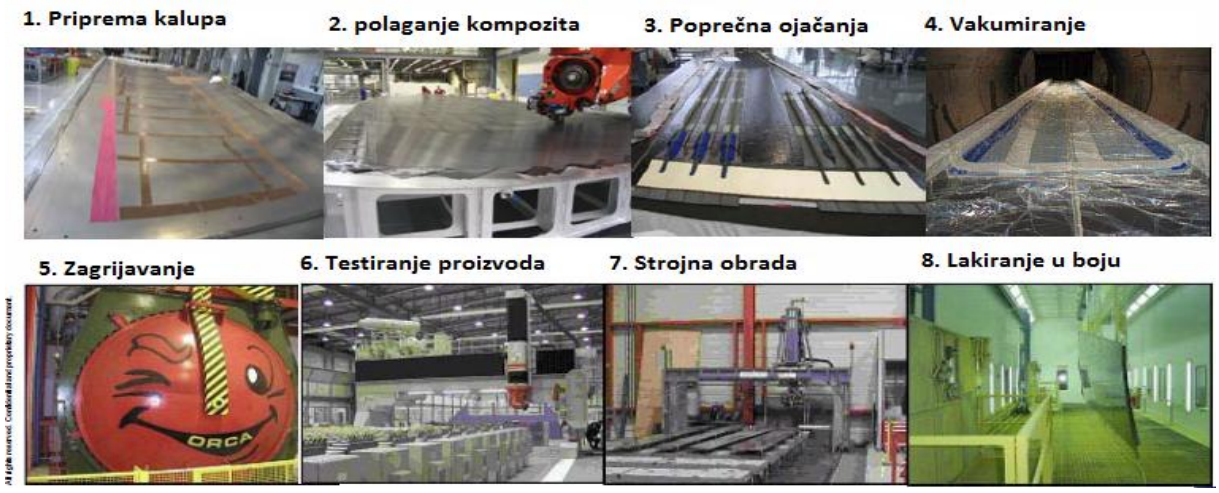
Također sposobnost materijala za oblikovanje ili obradu potrebno je uzeti u obzir kako kod kompozitnih materijala tako i kod ostalih konvencionalnih materijala. Od drugih zahtjeva tu su raspoloživost materijala, standardizacija, mogućnost recikliranja i estetika materijala koji također uvjetuju odabir za projektiranje.

Primjena kompozitnih materijala u zrakoplovnoj industriji uvelike raste, sa poboljšanim strukturalnim svojstvima uporabom kompozitnih materijala moguće je ispuniti kompleksne konstrukcijske zahtjeve.

Razvoj vrlo lakih, temperaturno otpornih kompozita omogućuje proizvodnju ekonomičnih zrakoplova nove generacije visokih performansi (slika 4). Uporaba takvih materijala smanjuje potrošnju goriva, poboljšava učinkovitost i direktno smanjuje operativne troškove zrakoplova.

Prednost kompozitnih materijala u oblikovanju raznih oblika, laminarnoj strukturi usmjerenih vlakana u svim smjerovima rezultira elementima vrlo visokih performansi. Primjer prednosti tih materijala je da se element može konstruirati na savijanje u jednom smjeru, ali ne i u drugom. [9]

[9] ibid



Slika 4. Proces proizvodnje elemenata od kompozitnih materijala

Izvor: http://www.compositesworld.com/articles/a350-a400m-wing-spars-a-study-in-contrasts

Najveću su primjenu kompozitnimaterijalisunašli pri izradi slijedećih konstruktivnih elemenata zrakoplova:

- Oplata
- Upravljačke površine
- Poklopci stajnog trapa
- Podne grede i ploče
- Komponente interijera
- Primarne strukture krila i trupa na novijim generacijama zrakoplova
- Lopatice ventilatora mlaznog motora
- Elise, rotori

4.1. Primjena na komercijalnim zrakoplovima

Najranije primjene kompozitnih materijala u zrakoplovnim konstrukcijama bile su zabilježene tijekom Drugog svjetskog rata. Razvoj kompozitnih materijala tekao je prilično sporo, te su se kompozitni materijali koristili za pojedine eksperimentalne konstrukcije zrakoplova i potrebe vojske.

Prve primjene kompozitnih materijala bile su za elemente koji su bili manje opterećeni, ali zahvaljujući razvoju kompozitnih materijala počeli su se rabiti i za složenije elemente kao što je oplata krila ili trupa zrakoplova.

Razvoj borbenih zrakoplova rezultirao je primjenom kompozitnih materijala u njihovoj konstrukciji za izradu oplate repnog kormila, trupa i krilnih struktura za koje su se najvećim dijelom koristili kompoziti epoksidnih smola ojačanih ugljičnim vlaknima.

Prve značajnije primjene kompozitnih materijala u civilnom zrakoplovstvu zabilježene su 1983. godine od tvrtke Airbus, proizvodnjom putničkih zrakoplova A300 i A310 u izradi kormila i repnog vertikalnog stabilizatora(slika 5).



Slika 5. Airbus A310

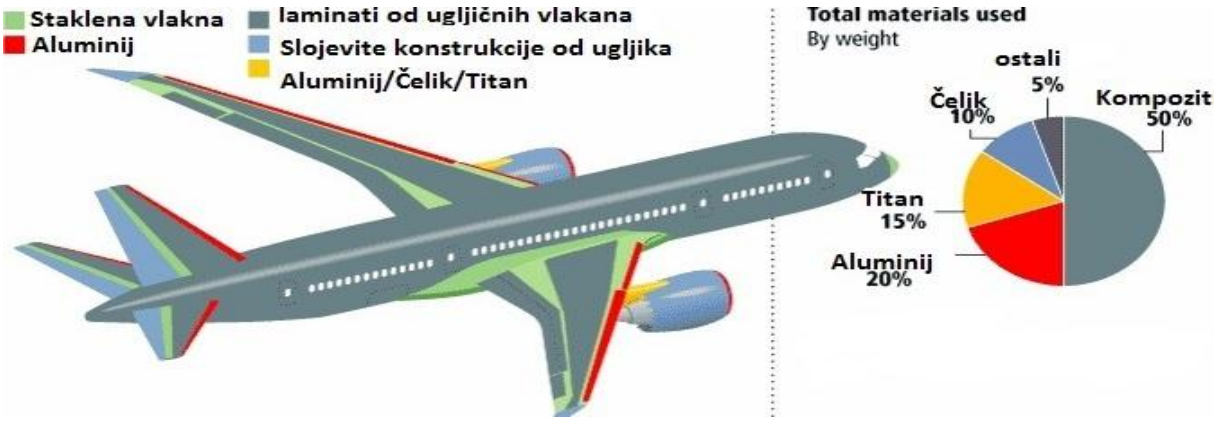
Izvor:https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ce/Airbus_A310_MRTT_2.jpg

Upotreba kompozitnih materijala primijenjena je na zrakoplovu Airbus A320 u ukupnoj masi zrakoplova u udjelu od 28%, od kompozitnih materijala izgrađena je cijela repna konstrukcija, podne obloge, i niz drugih elemenata.

Airbus A380 primjer je široke upotrebe kompozitnih materijala od kojih je načinjena kompletna gornja i donja oplata zrakoplova, ojačanja krila, konstrukcija poda gornje palube, repne i upravljačke površine, poklopci stajnog trapa i još mnogo konstrukcijskih elemenata. Osim polimernih kompozita, ugrađeni su laminirani elementi koji su izgrađeni od aluminijskih limova dodatno ojačanih staklenim vlaknima.[10]Sa tehnološkog aspekta najveću prednost ističe Boeing 787 Dreamliner (slika 6). Prvi putnički zrakoplov koji se sastoji od 50% dijelova izgrađenih od kompozitnih materijala. Primjena kompozitnih materijala

[10]http://www.airbus.com

omogućila je konstrukciju trupa zrakoplova iz nekoliko većih cjevastih elemenata koja podnosi veća tlačna opterećenja.[11]

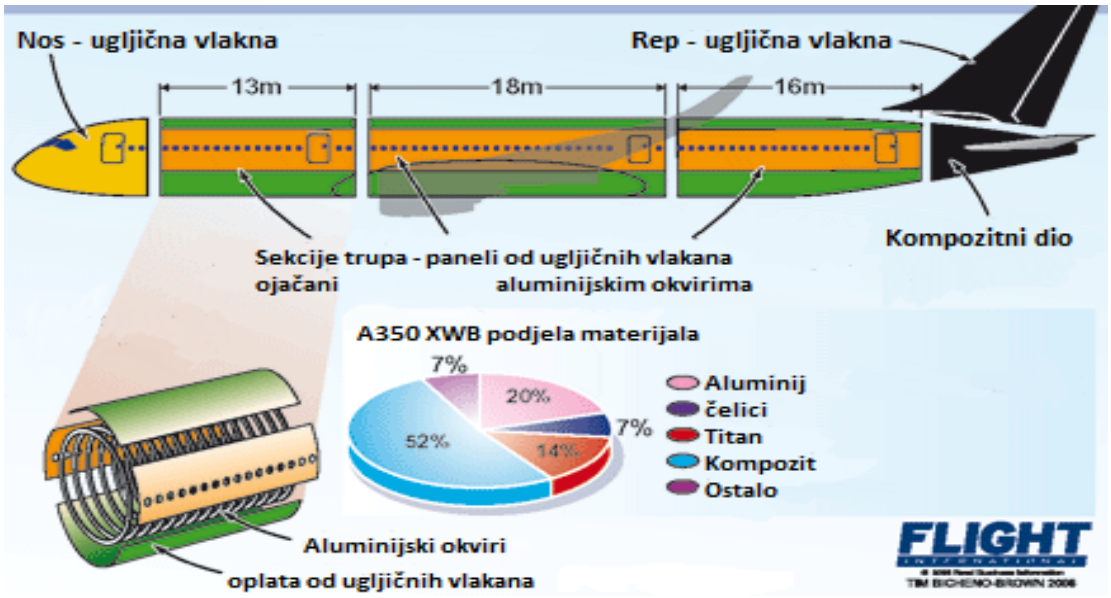


Slika 6. Materijali korišteni na zrakoplovu Boeing 787 Dreamliner

Izvor: http://www.appropedia.org/images/d/d7/Composites01.jpg

Također tvrtka Airbus konstruirala je putnički zrakoplov A350 XWB koji je izgrađen od ukupno 53% kompozitnih materijala (slika 7). Prvi je Airbus-ov zrakoplov čiji je trup 100% izgrađen od kompozitnih materijala. Jedan od razloga kompozitnog trupa je taj što osigurava više električke otpornosti (strujni udar) za razliku od zrakoplova koji se sastoji većinom od metala. Trup zrakoplova izgrađen je preko 50% od naprednih kompozitnih materijala povezujući najbolja svojstva tih materijala. Većina krila ovog zrakoplova izgrađena su od laganih kompozita od ugljičnih vlakana, uključujući gornju i donju oplatu, oplate motora, vrhovi krila te sve površine za upravljanje.[12]

[11] http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html
[12] http://www.compositestoday.com/tag/a350-xwb/



Slika 7. A350 XWB strukturalni pregled

Izvor: http://www.aviationnews.eu/blog/wp-content/uploads/2009/12/A350_Layout.gif

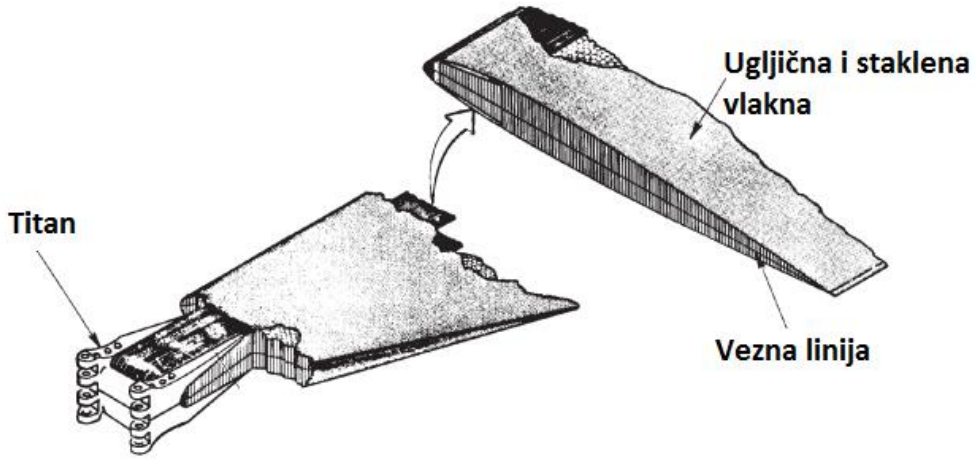
Danas se od kompozitnih materijala izrađuje sve više elemenata zrakoplovnih konstrukcija, kao što su napadni bridovi krila, kompozitna hibridna oplata trupa od metalnog i staklenim vlaknima ojačanog laminata. Oplata motora ojačana je aramidnim vlaknima kako bi uslijed izlijetanja rotirajućih elemenata motora što je više moguće zaštitila okolnu konstrukciju zrakoplova od udara i iskrenja. Primjenom kompozitnih materijala moguće je razviti i konstruirati kompleksne oblike kao što su zakrivljeni vrhovi krila (winglets), aerodinamične elemente zrakoplova koje je teško izvesti iz konvencionalnih materijala.

4.2. Primjena na helikopterima

Masa helikoptera jedan je od važnijih čimbenika u eksploataciji kojim se ograničuje količina tereta koju helikopter može prevesti. Kako bi se osigurala što veća učinkovitost, inženjeri zrakoplovnih tvrtki koriste lagane materijale kao što su kompoziti, s ciljem izgradnje što lakših helikoptera.

Kompozitni materijali korišteni su za izradu rotora helikoptera te su prihvaćeni kao materijal za izradu istih. Upotreba kompozita pruža poboljšanje aerodinamičkih svojstava rotora kao i materijalna svojstva koja odgovaraju istima. Usmjerena svojstva materijala idealna su za dugačke uske krakove rotora koji su usmjereno opterećeni duž cijele duljine. Šuplja struktura pruža ugradnju utega za balansiranje rotora ukoliko je potrebno, što

omogućuje da konstrukcija ostane izvorna. Povoljna strukturalna svojstva većine kompozitnih materijala omogućuju znatno bolje karakteristike ubrzanja i opterećenja rotora u usporedbi sa metalnim izvedbama (slika 8). U industriji helikoptera kompozitni materijali još se koriste za izradu oplate, konstrukcije, strukture repa, repnog rotora, uvodnika motora te niz drugih strukturalnih elemenata. [13]



Slika 8. Prikaz strukture rotora helikoptera

Izvor:
http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/cursosead/materiaiscompositos/compositematerials/f_aerospace_applications.pdf

4.3. Održavanje i pregled kompozitnih konstrukcija

Održavanje kompozitnih struktura zrakoplova svodi se na redovne preglede stanja strukture i ukoliko je potrebna reparacija pojedinih dijelova kompozita. Pregledi struktura sastoje se od ultrasoničnih ispitivanja koje su temeljne metode ispitivanja u pregledima kompozitnih struktura. Nedavne nove metode uključujući nove i napredne tehnike ispitivanja imaju povećan broj opcija inspekcije konstrukcija. Posljednjih godina niz eksperimenata su stvoreni kako bi sa konvencionalnom i naprednom opremom bilo moguće otkriti šupljine,

[13] http://acs-composites.com/index.cfm

delaminacije, oštećenja saćaste konstrukcije, lijepljenih spojeva elemenata, čvrstih laminata i pukotina u kompozitu.

Zbog vrlo teškog otkrivanja zamora kompozitnih struktura odnosno pukotina u laminatima i spojevima potrebno je ispitivanje vršiti metodom ne-destruktivne inspekcije (slika 9). Ta vrsta ultrazvučne inspekcije koristi se kako bi se različitim odbijanjem i širenjem valova kroz materijal otkrila pukotina ili oštećenje u kompozitnoj strukturi. Veći elementi pregledavaju se prolaskom rendgen, dok se manji elementi provjeravaju ručnim sondama. U zrakoplovstvu se također koristi i termografijska inspekcija koja se zasniva na zagrijavanjem elemenata te nadgledanja širenja topline po strukturi infracrvenom opremom. Ukoliko postoje nepravilnosti, toplina se različito širi duž strukture te se tako vrlo lako može ukazati na delaminacije, šupljine i pukotine.[14]



Slika 9. Ne-destruktivna inspekcija strukture zrakoplova

Izvor: http://www.g2metric.com/wp-content/uploads/2013/03/Controle-non-destructif-CND-1.jpg

[14] http://www.compositesworld.com/articles/assessing-conventional-and-advanced-ndi-for-composite-aircraft

5. Zahtjevi plovidbenosti zrakoplova izrađenih od kompozitnih materijala

5.1. Europski propisi za plovidbenost

Europska agencija za sigurnost zrakoplovstva (EASA) je propisala zahtjeve koji moraju biti ispunjeni za izdavanje certifikata o plovidbenosti zrakoplova. Certifikat se u velikoj mjeri temelji na generičkim zahtjevima koji se primjenjuju bez obzira koji se materijal koristi u izgradnji zrakoplova. EASA je u svom dokumentu AMC 20-29 dala opsežne smjernice o ispitivanju statičke čvrstoće i otpornosti na oštećenja prilikom korištenja kompozitnih materijala u izradi zrakoplovnih konstrukcija.

EASA zahtjevi za izdavanje plovidbenosti su kako slijedi:

- Razvoj materijala i kontrola proizvodnje
- Otpornost strukture – statička
- Otpornost strukture – zamor i tolerancija na udarce
- Otpornost strukture – vihorenje (flutter)
- Otpornost na udarce – uključujući dinamičke utjecaje
- Vatrootpornost, zapaljivost i termički utjecaji – AMC 25-16
- Zaštita strukture od udara munje – AMC 25.899
- Zaštita strukture od vanjskih utjecaja

Potrebno je osigurati da primjena kompozitnih materijala ne naruši razinu sigurnosti koja je osigurana, stoga je potrebno kvalitetno provesti sva ispitivanja vezana za zrakoplovne konstrukcije.Jedna od bitnih značajki kompozitnih materijala od kojih se izrađuju konstrukcijski elementi zrakoplova jest kvaliteta odnosno standardizacija proizvodnje tih materijala. Ovisno o načinu obrade i proizvodnje mogu varirati konačna mehanička svojstva kompozitnih materijala. Posebna se pozornost treba obratiti u kontroli proizvodnje materijala i kako se materijal nakon obrade dostavlja u tvornicu za daljnju proizvodnju.

Testiranja Europske agencije za sigurnost zrakoplovstva uzimaju u obzir razine naprezanja, spektar opterećenja, konstrukcijsko djelovanje na naprezanja, materijale, metode proizvodnje i utjecaj na okolinu. Materijal za izradu treba biti specificiran na razini svih

pojedinih elemenata od kojeg se sastoji kompozit kao što je smola, vlakna, čestice,itd. Testiranje kompozitnog materijala provodi se konstantnim dinamičkim testiranjem na 10.000 ciklusa i pokazuje ponašanje materijala izloženog naprezanjima, akumuliranje strukturalnog oštećenja koje pokazuje ponašanje kompozita na razini vlakana i matrice.

Testiranje strukture zrakoplova sastoji se mnogih kritičnih opterećenja strukture koja rezultiraju izdržljivost strukture u kritičnim uvjetima tijekom eksploatacije u granicama sigurnosti. Također provodi se i test maksimalnog opterećenja kojim se pokazuje izdržljivost strukture kada nosi maksimalni teret bez dodavanja sigurnosnih faktora. Neki od specijalnih faktora pri testiranju na opterećenja mogu biti koncentracije naprezanja, uvjeti okoline (vlaga, temperatura), varijacije materijala, proces proizvodnje materijala, karakteristike spojeva,itd. Test statičke izdržljivosti provodi se u posebnim uvjetima kojima bi se ispitale sve situacije tijekom eksploatacije strukture.

Testiranje strukture na vihorenje (flutter) također je jedno od bitnih testiranja, a provodi se na svim površinama za upravljanje, krilima te vertikalnom i horizontalnom stabilizatoru. Kako su svi elementi strukture povezani, ispitivanje se provodi na kompletnoj strukturi zrakoplova. [15]

Obavljanje ispitivanja pojedinih elemenata kao što su zglobovi, strukture spojeva više elemenata, detalji elemenata, zasebni elementi, struktura krila, segmenti trupa te horizontalnih i vertikalnih stabilizatora u zrakoplovnoj industriji su neizbježni.

Mehanički, kemijski i fizički testovi materijala koriste se kako bi pokazali čvrstoću, krutost, trajnost i pouzdanost materijala za uporabu u proizvodnji. Osim testiranja u uvjetima okoline, ispitivanja se rade i za izloženost ekstremnim temperaturama i uvjetima vlage.

Regulatorna tijela obraćaju posebnu pozornost na nove dizajne i koncepte struktura zrakoplova koji mogu izazvati posebne uvjete ispitivanja. Zbog stalnog razvoja kompozitnih materijala, agencija nastavlja proaktivno pristupati sigurnosti s ciljem predviđanja potencijalnih problema. Za kompozitne materijale za razliku od konvencionalnih primjenjuju se različite metodologije certificiranja i ispitivanja konstrukcijskih elemenata, te je iz tog razloga bitno pratiti razvoj te vrste materijala.

[15] https://www.easa.europa.eu

5.2. Američki propisi za plovidbenost

Stabilan izvor sirovina za sigurno i pouzdano korištenje kompozitnih materijala u proizvodnji zrakoplova je neizbježan.Testiranje ispravnosti i proces certificiranja komercijalnih zrakoplova su vrlo strogi zbog specifičnosti kompozitnih materijala. Analizu pristupa i strukturalno testiranje izvodi se i usklađuje poregulacijama Savezne uprave za civilno zrakoplovstvo (FAA).

FAA zahtjevi za odobrenje materijala:

- FAR 25.613, Svojstva čvrstoće materijala
- FAR 25.615, Svojstva strukture
    - A – osnove za jednosmjerna opterećenja
    - B – osnove za opterećenja strukture
- FAR 25.603, Materijali
    - prikladnost i izdržljivost utvrđuje se testiranjima
    - usklađivanje sa specifikacijama koje osiguravaju čvrstoću
    - uzimaju se u obzir uvjeti okoline
- FAR 25.605, Metode proizvodnje
    - Metode proizvodnje moraju proizvesti dosljednu čvrstoću strukture
    - Nove metode proizvodnje moraju se potkrijepiti ispitivanjima
- FAR 25.609, Zaštita strukture
    - Struktura mora biti zaštićena od propadanja ili gubitka čvrstoće
- FAR AC 20-107A, Kompozitna struktura zrakoplova
    - Predstavlja prihvatljivo ali ne i jedino sredstvo za certificiranje napredne kompozitne strukture
- FAR AC 21-26, Kontrola kvalitete proizvodnje kompozitne strukture

Savezna uprava zrakoplovstva propisala je propise u vezi certificiranja plovidbenosti konstrukcija zrakoplova koje su izgrađene od kompozitnih materijala. Također predstavljene su i smjernice za dizajn, proizvodnju i održavanje istih. Certificiranje plovidbenosti kompozitnih struktura i proizvodnih procesa za zrakoplove trebalo bi biti po FAR 25.603, FAR 25.605, FAR 25.609, FAR 25.613 regulativama koje zahtijevaju da svi kompozitni

materijali i i metode koje se koriste u strukturama zrakoplova budu kvalificirani i ispitani za pouzdanu primjenu.

Za stjecanje plovidbenosti kompozitnih struktura zrakoplov bi trebao biti proveden po FAA normama koje trebaju uzeti u obzir sve kritične slučajeve opterećenja. Jedno od vrlo bitnih ispitivanja je ispitivanje statičke čvrstoće konstrukcije zrakoplova (slika 10). Takvo ispitivanje potvrđuje predviđena unutarnja opterećenja konstrukcije. Također je potrebno zadovoljiti ispitivanja kao što su otpornost na sudare (konfliktne situacije s vozilima prihvata i otpreme), zaštite od požara, zapaljivost, zaštita kompozitne strukture od udara munje,itd.[16]



Slika 10. Ispitivanje statičke čvrstoće konstrukcije zrakoplova

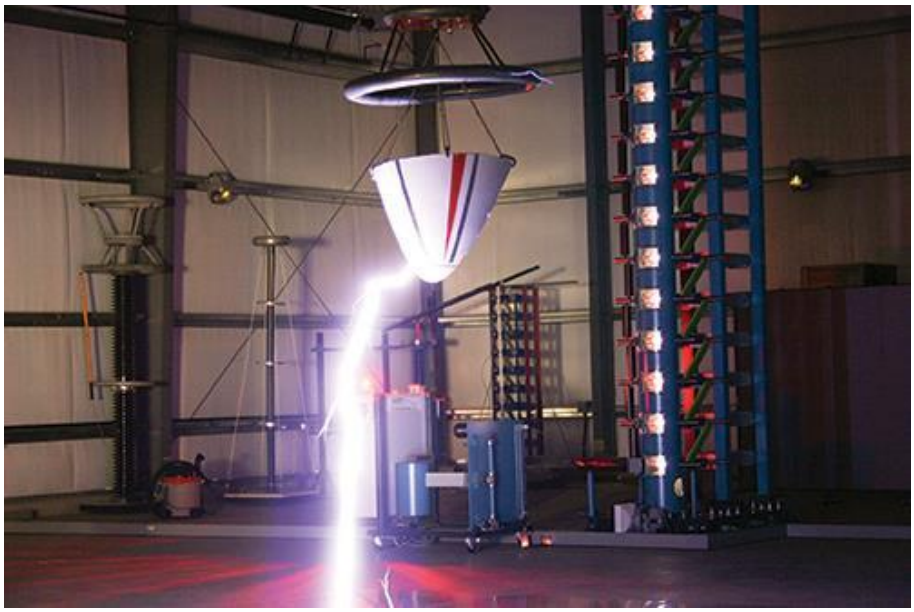
Izvor: http://theatlasgroup.biz/structural-loads-wings-important-aspect-aircraft-testing/

5.3. Zaštita zrakoplova od udara munje

Zaštita zrakoplova od udara munje treba po EASA standardima izdržati 200.000 Ampera trenutne struje kako udar munje u letu nebi poremetio rad elektronike, i električnih sustava, isparavanje smole u kompozitu, mogućnost zapaljenja goriva,itd (slika 11). Također ovo ispitivanje se vrši i po američkim FAA propisima. Kod zrakoplova izrađenih od kompozitnih materijala koji nisu vodljivi poput metala potrebno je primijeniti zaštitu vodljivim materijalom malog otpora preko cijelog eksterijera zrakoplova, poput aluminijske folije ili bakrene mreže čime se omogućuje brzo pražnjenje struje sa zrakoplova[17].

[16] https://www.faa.gov

[17] http://rense.com/general95/airios.htm



Slika 11. Testiranje elementa zrakoplova na udar munje

Izvor: http://www.compositesworld.com/articles/lightning-strike-protection-strategies-for-composite-aircraft

Specifikacije materijala, obrada i postupci u izradi propisani su kako bi se osigurala osnova za izradu proizvodne i pouzdane strukture zrakoplova. Specifikacije su potrebne kako bi se kontrolirala proizvodnja, te izvršavanje testiranja s ciljem osiguranja da svojstva materijala ostanu nepromijenjena tijekom vremena. Procesni parametri ispitnih uzoraka trebaju odgovarati procesnim parametrima koji se koriste u proizvodnji stvarnih dijelova što je više moguće. Specijalni uvjeti očituju se u sudarima, pri čemu je vrlo bitna stavka otpornost strukture kabine na sudare. Uporaba kompozita može mijenjati ponašanje strukture za razliku od metalnih konstrukcija. Ispitivanje i analiza ponašanja kompozitne strukture zrakoplova mora biti prihvatljivo u odnosu na dosadašnje metalne konstrukcije i omogućiti kriterij preživljavanja. Također ispitivanje otpornosti spremnika za gorivo na udarce za koje su trenutni zahtjevi samo paneli oplate spremnika kao kod konvencionalnih konstrukcija od metala. Stjenke spremnika za gorivo uslijed udarca od otpadaka guma ili motora mora pokazati jednaku ili bolju otpornost od zrakoplova metalnih konstrukcija[18].

[18]Baker, A., Dutton, S., Kelly, D.: Composite Materials For AircraftStructures, American institute ofAeronauticsandAstronautics, SAD, 2004., str. 171-188

6. Zrakoplovi tvrtke Pipistrel i primjena kompozitnih materijala

Tvrtka Pipistrel je proizvođač zrakoplova iz Slovenije koja je osnovana 1989. godine, te je do sada proizvela preko tisuću zrakoplova. Tvrtka Pipistrel poznata je po inovacijama, performansama i učinkovitosti svojih zrakoplova raznih modela od jednosjeda do četverosjeda koji se prodaju diljem svijeta. Zapošljava 80 ljudi među kojima su inženjeri iz područja istraživanja i razvoja aerodinamike, strukture, računalnog projektiranja, mehaničkog projektiranja, elektroničkog projektiranja, te strukturalno testiranje i testiranje u letu. Tvrtka ima veliko iskustvo u kompleksnim projektima, koje potkrjepljuju zrakoplov četverosjedPanthera koji je certificiran u skladu sa EASA CS23 standardima (slika 12). Tvrtka je dobila brojne nagrade među kojima je osvajanje NASA Green FlightChallenge natjecanja za zrakoplov najveće energetske učinkovitosti sa modelom Taurus G4 na električni pogon. Modelima Sinus i Virus osvojena su brojna NASA-ina natjecanja u performansama. Pipistrel koristi tehnike računalne dinamike fluida od 2007. godine za projektiranje zrakoplova. Pipistrel pruža jasne industrijske slučajeve koje se tehnološkim razvojem kroz projekt mogu direktno primijeniti[19].



Slika 12. Zrakoplov Panthera tvrtke Pipistrel

Izvor: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/Pipistrel_Panthera_aircraft.JPG

[19] http://www.pipistrel.si

Tablica 2. Tehnički podaci konkurentnih zrakoplova

	PipistrelPanthera	Piper Archer II	Cessna 182 skylane	Maule M7-235B
Pogonska snaga (ks)	210	180	230	235
Maksimalna masa u polijetanju (kg)	1.315	1.160	1.202	1.136
Plaćeni teret (kg)	545	435	398	407
Kapacitet goriva (l)	210	182	200,6	275
Razmah (m)	10,86	10,7	11	10,5
Duljina (m)	8,07	7,3	8,2	7,2
Površina krila (m^2)	11,2	15,8	16.2	15,3
Dolet (km)	1.852	1.111	1.272	1.610
Potrošnja goriva (l/h)	35	33,3	38	45,3
Potrebna duljina za uzlijetanje (m)	670	495	461	315
Potrebna duljina za slijetanje (m)	570	424	407	415
Minimalna brzina (km/h)	111	90	90,1	80
Brzina krstarenja sa 75% snage (km/h)	335	233	238	253
Brzina penjanja (m/s)	6,1	3,7	4,7	5,1

Izvor: www.mauleairinc.com, www.panthera-aircraft.com, www.piper.com, www.cessna.txtav.com

U tablici 2. prikazana je usporedba tehničkih karakteristika i performansi zrakoplova Phantom tvrtke Pipistrel sa zrakoplovima iste kategorije Piper Archer II, Cessna 182 skylane i Maule M7-235B koji su izgrađeni od metalnih konstrukcija. Iz prikazane tablice vidljivo je da zrakoplov Panthera zbog svoje vrlo male konstrukcijske mase ima mogućnost prevesti plaćeni teret veći za 20% od konkurencije dok su pogonske snage približno jednake. Dimenzijski su zrakoplovi slični, ali zrakoplov Panthera se ističe površinom krila manjom za oko 25% što uvelike smanjuje aerodinamički otpor. Također prema podacima iz tablice vidljivo je zrakoplov Panthera ima daleko najveću brzinu krstarenja dok su krstareće brzine konkurentnih zrakoplova manje do 30%. Potrošnja goriva najveća je kod zrakoplova Muale M7-235B, dok zrakoplov Panthera ima prosječnu potrošnju goriva. Zrakoplov Panthera zahtjeva nešto veće duljine za polijetanje i slijetanje nego li je to slučaj kod konkurentnih zrakoplova zbog nešto veće minimalne brzine koja je posljedica manje površine krila i najveće maksimalne mase pri polijetanju. Također je vidljivo da zrakoplov Panthera ima najveću brzinu penjanja kao i najveći dolet u usporedbi sa konkurentnim zrakoplovima. Primjenom kompozitnih materijala postigle su se performanse zrakoplova koje prednjače u usporedbi sa konkurentnim zrakoplovima metalnih konstrukcija.

Tvrtka Pipistrel primjenjuje kompozitne materijale na svim svojim zrakoplovima. Iako je vanjski izgled svakog zrakoplova aerodinamičkog dizajna i naprednih oblika, struktura trupa i krila zrakoplova sastoji se od niza kombinacija i struktura kompozitnih materijala koji zajedno daju visoke performanse. Okvir kabine zrakoplova izgrađen je od slojevitog kompozita ispletenih ugljičnih, staklenih i aramidnih vlakana koji apsorbira energiju i prilikom teških udara. Oplata zrakoplova izgrađena je od kompozitnih laminata ojačanih ugljičnim vlaknima koji daju glatku površinu koja omogućuje vrlo mali aerodinamički otpor. Za primarnu konstrukciju krila i trupa zrakoplova koriste se kompozitni strukturalni materijali od aramidne jezgre ojačane ugljičnim vlaknima te pjenasti strukturalni kompoziti. Sve te vrste kompozitnih materijala predstavljaju hibridne kompozite naprednih svojstava.

Primjenom kompozitnih materijala, a time i velikom uštedom na težini, ovi zrakoplovi su mnogo tiši, sigurniji i brži od zrakoplova izgrađenih od konvencionalnih materijala. Vrlo mala težina ovih zrakoplova u odnosu na ostale metalnih konstrukcija omogućuje ovim zrakoplovima korištenje mnogo kraćih uzletno sletnih staza i dolet velikih udaljenosti. Kompozitni zrakoplovi opremljeni tehnološki najmodernijim pogonskim sustavima troše 40%

manje goriva dok lete brže i dalje. Robusni dizajn podvozja i mala ukupna težina zrakoplova omogućuju operacije polijetanja i slijetanja na kratkim travnatim uzletno sletnim stazama.

Što se tiče sigurnosti,Pipistrel je razvio konstrukciju kabine od kompozitnih ćelija i profila koji apsorbiraju energiju daleko bolje od metalnih konstrukcija. Još jedna prednost ovih zrakoplova vrlo male težine uz pogonske motore koji razvijaju dovoljno snage je dostizanje sigurnih brzina i visina tijekom leta mnogo brže, smanjenjem potrebnog vremena u kritičnim zonama. Posebna pažnja posvećena je izgradnji aerodinamičkog oblika koji pruža kvalitetno upravljanje na malim brzinama i odlične karakteristike.

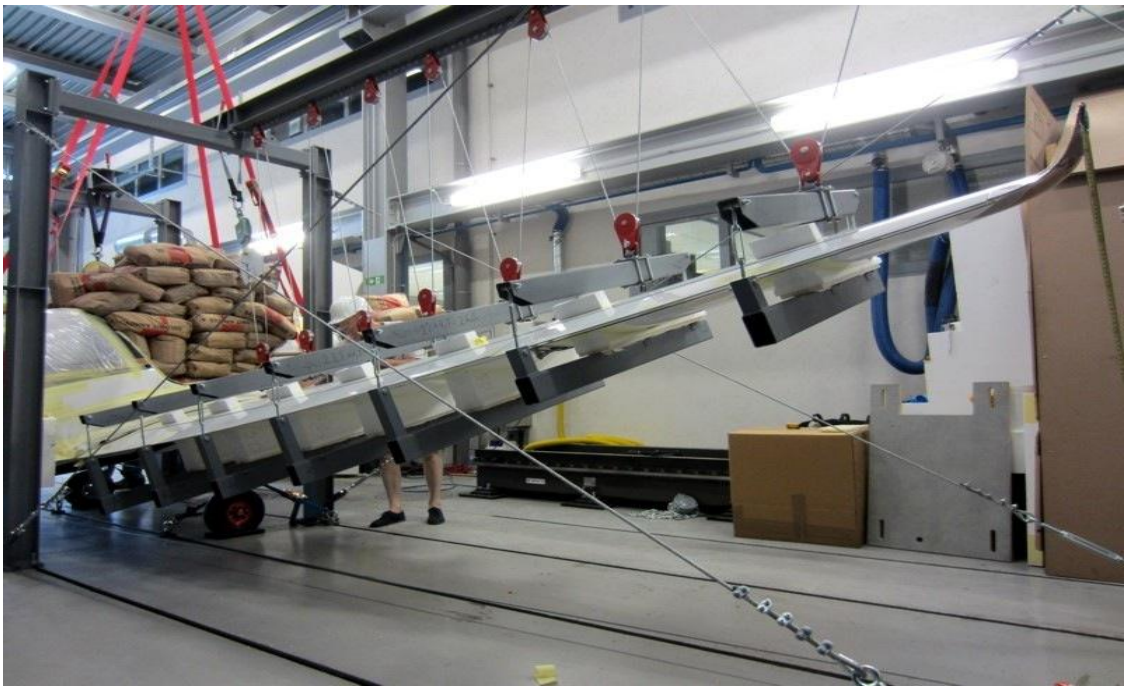
Zrakoplovi imaju odlična konstrukcijska rješenja što se tiče otvora za redovni pregled i održavanje glavnih sustava zrakoplova, što uvelike olakšava pristup svim elementima zrakoplova, a smanjuje utrošeno vrijeme za rad. U usporedbi sa metalnim strukturama, kompozitni materijali nemaju sklonost korodiranju što je također velika prednost održavanja ove vrste zrakoplova.

Strukture ovih zrakoplova dimenzijski su stabilne i rasterećene od unutarnjih naprezanja prilikom izloženosti različitim temperaturnim uvjetima, što nije slučaj kod struktura od metala.

Kompozitne konstrukcije omogućuju i razvoj hibridnih zrakoplova kojima je tvrtka Pipistrel došla na sami vrh razvoja zrakoplova sa što manjim emisijama štetnih plinova. Struktura izgrađena od kompozita pruža uklapanje svih mehaničkih i elektroničkih sustava unutar konstrukcije zrakoplova što također uvjetuje izvrsnom balansiranju zrakoplovne konstrukcije. Konstrukcije izgrađene u potpunosti od kompozita omogućuju uklapanje i drugih materijala kao što su solarni paneli u oplati krila i trupa uz održavanje vrlo malih težina konstrukcije. To je još jedna prednost kompozitnih konstrukcija u izgradnji efikasnijih i ekonomičnijih ekološki prihvatljivih zrakoplova.

Certificiranje zrakoplova podliježe strukturalnim testovima zrakoplova pomoću specijalizirane opreme za ispitivanje. Testiranje je projektirano kako bi se struktura ispitala izloženim torzijskim naprezanjima i deformacijama, izloženost vibracijama te naprezanje trupa i krila na savijanje i udarce (slike 13 i 14). Kontrolna testiranja jamče najviše G-sile kojima zrakoplov može biti izložen u letu. U suradnji sa EASA-om Pipistrelovi zrakoplovi su certificirani po najnovijim standardima[20].

[20]ibid



Slika 13. Testiranje konstrukcije zrakoplova na opterećenje savijanjem

Izvor: http://www.pipistrel.ca/Panthera/Pipistrel_Panthera_News/files/category-panthera.html



Slika 14. Ispitivanje statičke čvrstoće konstrukcije

Izvor: http://www.pipistrel.ca/Panthera/Pipistrel_Panthera_News/files/category-panthera.html

Primjenom kompozitnih materijala tvrtka Pipistrel razvila je zrakoplove visokih performansi, sa najvišom razinom sigurnosti i pouzdanosti, te je svoje tržište pronašla diljem svijeta. Gotovo tisuću zrakoplova tvrtke Pipistrel lete na svih šest kontinenata u uvjetima koji su ponekad teško zamislivi. Struktura i svi sustavi zrakoplovi izdržali su rigorozna testiranja kako bi se osiguralo da je zrakoplov pouzdan u svim uvjetima.

Primjenom najsuvremenijih rješenja ovi zrakoplovi imaju vrlo male troškove održavanja kao i operativne troškove. Pipistrelovi zrakoplovi također mogu biti opremljeni sigurnosnim balističnim padobranom koji spašava kompletan zrakoplov sa posadom u slučaju opasnosti. Tvrtka nastavlja sa intenzivnim ulaganjem u istraživanje, visoku tehnološku opremu i daljnji razvoj.

7. Zaključak

U ovom završnom radu prikazala se primjena kompozitnih materijala u zrakoplovnim konstrukcijama, opisane su pojedine podvrste kompozitnih materijala te su prikazana svojstva, prednosti i nedostaci svake vrste zasebno. Standardizacija i zahtjevi za plovidbenost zrakoplovnih konstrukcija prate razvoj kompozitnih materijala što je neophodno u zrakoplovnoj industriji. Ukazana je i problematika u eksploataciji zrakoplova izgrađenih od kompozitnih materijala te suvremene metode i ispitivanja koje omogućuju prvenstveno sigurnost.

Korištenje naprednih kompozitnih materijala u komercijalnom transportu za primarne i sekundarne strukturne elemente nastavlja svoj rast. Glavni izazov zrakoplovnog inženjerstva je pronaći kompletne prednosti kompozitnih materijala nad konvencionalnim te iskoristiti ih u proizvodnji još efikasnijih i sigurnijih zrakoplova. Uporabom takvih naprednih materijala smanjivat će se i štetan utjecaj za okolinu što je danas također jedno od vrlo važnih pitanja. Buduća tehnologija kompozita pružat će proizvodne materijale nižih cijena, i automatizaciju procesa koja će poboljšati proizvodnu učinkovitost. Danas se mnogo ulaže u razvoj još boljih kompozitnih materijala dok dosadašnjima pada cijena i povećava se dostupnost.

Uglavnom kompozitni materijali pokazali su dobra iskustva do sada iako saćasti paneli i apsorpcija vlage u panelima strukture i dalje ostavljaju zabrinutost. Nema posebnih razloga za zabrinutost kada je u pitanju umor materijala kao što je slučaj kod metala, kvaliteta proizvodnje je održana tijekom vremena eksploatacije. U stalnom razvoju očekuje se da će optimizacija procesa i tendencija uštede težine povećati potrebu osiguravanja analiza i metoda ispitivanja u cilju veće sigurnosti i pouzdanosti kompozitnih materijala.

Primjena kompozitnih materijala u izgradnji zrakoplova tvrtke Pipistrel zasniva se na iskustvenom razvoju u primjeni te vrste materijala kao i u razvoju samih kompozitnih materijala. Zrakoplovi tvrtke Pipistrel jedni su od najsuvremenijih i najsigurnijih ultralakih zrakoplova, a intenzivan rad i razvoj inženjera tvrtke vodi proizvodnji zrakoplova visokih performansi koji dominiraju diljem svijeta.

Primjena kompozitnih materijala u konstrukcijama zrakoplova uvelike raste i sve više zamjenjuje konvencionalne materijale. Mnogim hibridnim kompozitnim materijala naprednih svojstava moguće je konstruirati mnoge kompleksne elemente zrakoplova. Otpornost koju

posjeduju kompozitni materijali na mehaničke, kemijske i temperaturne uvjete, ovu vrstu materijala čini vrlo atraktivnom za primjenu u zrakoplovnoj industriji. Upravo svojstvima kompozitnih materijala omogućuje se razvoj ekonomičnih zrakoplova nove generacije. Kompozitna struktura kako krila tako i trupa zrakoplova vrlo vjerojatno će postati svakodnevna primjena u izradi budućih modernih zrakoplova.

Kao rezultat uporabe te vrste materijala direktno se smanjuje konstrukcijska težina zrakoplova a time i smanjenje potrošnje goriva, smanjenje operativnih troškova zrakoplova, povećava plaćeni teret i letne performanse zrakoplova. Vrlo dobra svojstva oblikovanja kompozitnih materijala pružaju inženjerima zrakoplovne industrije mogućnost za razvoj dizajna zrakoplova visokih aerodinamičkih karakteristika. Kompozitni materijali su materijali budućnosti za zrakoplovnu industriju i njihovim razvojem u nano-tehnologiji proizvodit će se materijali naprednih svojstava koji su danas još vrlo skupi za primjenu.

LITERATURA

1. Filetin, T., Kovačiček, F., Indorf, J.: *Svojstva i primjena materijala,* FSB, Zagreb, 2002.

2. Hull, D.,Clyne, T. W.: *AnIntroduction to Composite Materials,* CambrigeUniversityPress 1996.

3.Smojver, I.: *Mehanika kompozitnih materijala,* FSB, Zagreb, 06/2007.

4. Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: *Zrakoplovna prijevozna sredstva 1*, FPZ, Zagreb, 2008.

5. Baker, A., Dutton, S., Kelly, D.: *Composite Materials For AircraftStructures*, American institute ofAeronauticsandAstronautics, SAD, 2004.

INTERNET IZVORI

6.http://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/composites/Composites_Overview.htm (srpanj, 2015.)

7. http://www.premix.com/why-composites/adv-composites.php(srpanj, 2015.)

8.http://www.airbus.com(srpanj, 2015.)

9.http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html(srpanj, 2015.)

10. http://www.compositestoday.com/tag/a350-xwb/(srpanj, 2015.)

11. http://acs-composites.com/index.cfm(kolovoz, 2015.)

12. http://www.compositesworld.com/articles/assessing-conventional-and-advanced-ndi-for-composite-aircraft(kolovoz, 2015.)

13. https://www.faa.gov(kolovoz, 2015.)

14. http://rense.com/general95/airios.htm (kolovoz, 2015.)

15. https://www.easa.europa.eu(kolovoz, 2015.)

16. http://www.pipistrel.si(srpanj, 2015.)

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz kompozita ojačanih vlaknima.....5

Slika 2. Prikaz slojevitog kompozita.....7

Slika 3. Prikaz strukturalnog kompozitnog materijala.....8

Slika 4. Proces proizvodnje elemenata od kompozitnih materijala.....12

Slika 5. Airbus A310.....14

Slika 6. Materijali korišteni na zrakoplovu Boeing 787 Dreamliner.....14

Slika 7. A350 XWB strukturalni pregled.....15

Slika 8. Prikaz strukture rotora helikoptera.....16

Slika 9. Ne-destruktivna inspekcija strukture zrakoplova.....17

Slika 10. Ispitivanje statičke čvrstoće konstrukcije zrakoplova.....19

Slika 11. Testiranje elementa zrakoplova na udar munje.....20

Slika 12. Zrakoplov Panthera tvrtke Pipistrel.....22

Slika 13. Testiranje konstrukcije zrakoplova na opterećenje savijanjem.....23

Slika 14. Ispitivanje statičke čvrstoće konstrukcije.....24

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tablica mehaničkih svojstava materijala.....10

Tablica 2. Tehnički podaci konkurentnih zrakoplova.....25

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

METAPODACI

Naslov rada: Primjena kompozitnih materijala u zrakoplovnim konstrukcijama

Autor: Antun Meić Sidić

Mentor: doc. dr. sc. Andrija Vidović

Naslov na drugom jeziku (engleski):

Use of Composite Materials in Aircraft Construction

Povjerenstvo za obranu:

- prof. dr. sc. Željko Marušić, predsjednik
- doc. dr. sc. Andrija Vidović, mentor
- mr. sc. Miroslav Borković, član
- doc. dr. sc. Anita Domitrović, zamjena

Ustanova koja je dodjelila akademski stupanj: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu

Zavod: Zavod za zračni promet

Vrsta studija: Sveučilišni

Naziv studijskog programa: Promet

Stupanj: preddiplomski

Akademski naziv: univ. bacc. ing. traff.

Datum obrane završnog rada:

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj završni rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog rada pod naslovom **Primjena kompozitnih materijala u zrakoplovnim konstrukcijama**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, _____ _____

(potpis)