

# Primjena kompozitnih materijala u zrakoplovnoj industriji

---

Štimac, Matija

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Polytechnic Pula - College of Applied Sciences / Politehnika Pula - Visoka tehničko-poslovna škola s pravom javnosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:212:620016>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-04**



Repository / Repozitorij:

[Digital repository of Istrian University of applied sciences](#)



**PREDDIPLOMSKI STRUČNI STUDIJ POLITEHNIKE**

**ZAVRŠNI RAD**

**PRIMJENA KOMPOZITNIH MATERIJALA U ZRAKOPLOVNOJ INDUSTRIJI**

Kolegij: Tehnika materijala 2

Mentor: prof.dr.sc. Božo Smoljan

Student: Matija Štimac

PULA, rujan 2016.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	3
2. KOMPOZITNI MATERIJALI .....	5
2.1. Povijesni razvoj kompozitnih materijala .....	5
2.2. Matrica .....	6
2.3. Ojačalo .....	9
2.3.1. Kompoziti ojačani česticama .....	9
2.3.2. Kompoziti ojačani vlaknima .....	10
2.3.3. Strukturni kompoziti .....	13
3. IZBOR I SVOJSTVA KOMPOZITNIH MATERIJALA .....	16
3.1. Izdavanje certifikata o plovidbenosti zrakoplova .....	17
4. PREDNOSTI I NEDOSTATCI KOMPOZITNIH MATERIJALA .....	19
4.1. Prednosti .....	19
4.2. Nedostaci .....	20
5. PRIMJENA KOMPOZITNIH MATERIJALA U ZRAKOPLOVSTVNOJ INDUSTRIJI .....	21
5.1. Razvoj zrakoplovne industrije .....	21
5.2. AIRBUS A380 .....	25
5.3. Boeing 787 Dreamliner .....	27
5.4. Bell-Boeing V-22 Osprey .....	28
5.5. Trendovi primjene razvoja u zrakoplovnoj industriji .....	29
6. ZAKLJUČAK .....	30
LITERATURA .....	31
POPIS SLIKA .....	32
POPIS TABLICA .....	32

# 1. UVOD

Današnja moderna tehnologija zahtjeva materijale sa kombinacijom svojstva koju nemaju ni legure ni keramički materijali ni polimeri. Kao primjer možemo navesti zrakoplovne konstrukcije u kojima se od materijala zahtjeva velika krutost, čvrstoća te mala gustoća. Ovakva svojstva imaju kompozitni materijali koji su napravljeni od dva ili više materijala različitih svojstva. Primjena kompozitnih materijala postala je vrlo važna u zrakoplovnim konstrukcijama.

Zahvaljujući brojnim inovacijama na području razvoja postojećih materijala i stvaranjem novih vrsta materijala omogućen je razvoj zrakoplovstva koje je zahvaljujući tomu bitno napredovalo. Zbog uporabe kompozitnih materijala u današnjoj proizvodnji zrakoplova, sve su te konstrukcije manje mase, trajnije, pouzdanije od nekadašnjih. Masovnom uporabom kompozitnih materijala ulagalo se u razvoj boljih i jeftinijih tehnologija za proizvodnju te vrste materijala. Danas je većina zrakoplova građena od kompozita što omogućuje visoke performanse zrakoplova, kao što su učinkovitost, sigurnost i ekološka prihvatljivost.

## SVRHA

Svrha ovog završnog rada je istraživanje primjene kompozitnih materijala u zrakoplovnoj industriji. U radu su opisane razne vrste kompozita, njihova svojstva, prednosti i nedostaci.

## CILJ

Cilj završnog rada bio je usporediti kompozitne materijale sa ostalim materijalima koji se primjenjuju u zrakoplovnoj industriji te prikazati njihove prednosti i nedostatke.

Završni rad sastoji se od 6 poglavlja:

1. Uvod
2. Kompozitni materijali

3. Izbor i svojstva kompozitnih materijala
4. Prednosti i nedostaci kompozitnih materijala
5. Primjena kompozitnih materijala u zrakoplovnoj industriji
6. Zaključak

U početnom dijelu rada opisana su opća obilježja kompozitnih materijala, definicija, dijelovi od kojih se sastoji (matrica i ojačalo), podjela matrica, prednosti i nedostaci navedenih matrica te je opisana podjela kompozita prema vrsti ojačala.

U slijedećem dijelu opisani su kriteriji i zahtjevi koji su potrebni za što kvalitetniji izbor materijala u zrakoplovnoj industriji te su opisana svojstva takvih materijala.

Nakon toga predstavljeni su prednosti i nedostaci kompozitnih materijala te je prikazana usporedba kompozita i tradicionalnih materijala.

Peto poglavlje odnosi se na opis primjene kompozitnih materijala u zrakoplovnoj industriji. Opisan je povijesni razvoj primjene kompozita, te primjena kompozita u komercijalnim zrakoplovima kao što su Airbus i Boeing.

U završnom, zaključnom dijelu predstavljen je spoj svih navedenih primjena kompozitnih materijala u zrakoplovnoj industriji te njihov značaj kao temelj proizvodnje što sigurnijih, učinkovitijih i ekološki prihvatljivih zrakoplova.

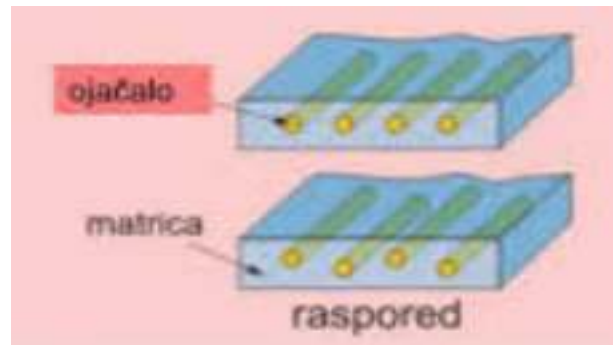
## **2. KOMPOZITNI MATERIJALI**

### **2.1. Povijesni razvoj kompozitnih materijala**

Proizvodnja kompozitnih materijala seže do samih početaka ljudske povijesti. Svakodnevni život čovjeka kroz povijest određen je otkrivanjem, proizvodnjom, preradom i primjenom različitih materijala. U početku čovjek je uzimao materijale iz prirode (drvo, kamen, glinu, kosti) te ih oblikovao primitivnim postupcima u uporabne predmete. S vremenom proizvedeni su i prvi tehnički materijali kao što su željezo, bronca, čelik i beton. Tek u novijoj povijesti otkriveni su postupci za dobivanje suvremenih materijala kao što su čelik, aluminijske legure te polimerni materijali. Prve pojave kompozitnih materijala bile su izgrađene od smjese koja je povezivala materijal veće čvrstoće. Među najstarijim kompozitnim materijalima ubraja se i armirani beton koji se uspješno koristi i danas. Beton je vrlo krut i tvrd kao zasebni materijal te se kombiniranjem njega i željezne mrežne konstrukcije koja je elastična dobiva materijal koji ima svojstva oba materijala. Doba suvremenih kompozitnih materijala započelo je 60-tih godina prošlog stoljeća razvojem borovih vlakana koji imaju specifičnu čvrstoću i veliku krutost. Daljnjim razvojem usmjerilo se na pronalazak i izradu onih kompozita koji su jeftiniji, manje zagađuju okoliš, lakše se izrađuju i recikliraju te su zamjena za najčešće korišteni materijal čelik ili aluminij.

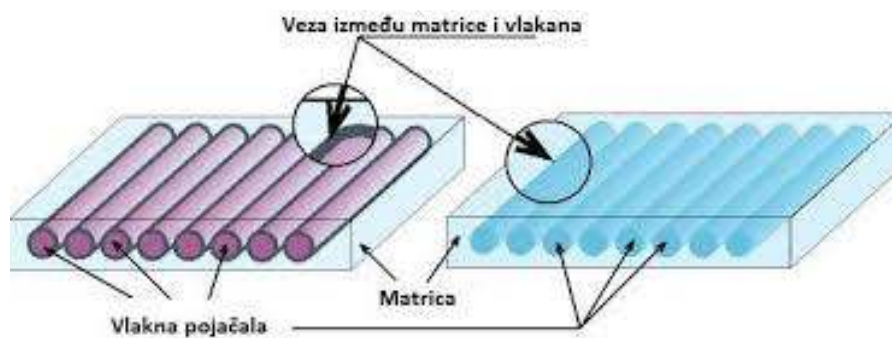
Kompozitni materijali nastali su spajanjem dva ili više materijala različitih svojstva s ciljem stvaranja novih svojstva koje svaki materijal sam za sebe ne bi imao. Pritom se ne radi samo o poboljšanju preradbenih i uporabnih svojstava (npr. povećanje specifične čvrstoće i specifičnoga modula elastičnosti, lomne žilavosti, toplinske postojanosti, otpornosti prema abraziji i puzanju), nego i transporta i skladištenja uključujući konačno i cijenu.

Svaki kompozitni materijal sastoji se od matrice (osnovnog materijala) i ojačala (materijala za očvršćivanje), vidljivo na slici 1 i 2.



Slika 1. Raspored matrice i ojačala u kompozitu

Izvor: [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1337854186-0-materijaliikompoziti-gm.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1337854186-0-materijaliikompoziti-gm.pdf)



Slika 2. Prikaz veze između matrice i vlakana

Izvor: [http://mohan.mse.gatech.edu/Research/stereocomplex\\_fiber/fig2.JPG](http://mohan.mse.gatech.edu/Research/stereocomplex_fiber/fig2.JPG)

## 2.2. Matrica

Uloga matrice je povezati ojačala, zaštititi ih od vanjskih utjecaja i oštećenja, a obzirom da je matrični materijal žilav, opterećenje se prenosi na ojačalo u svrhu sprečavanja slabljenja kompozita.

Prema vrsti materijala matrica može biti:

- metalna,
- keramička,
- polimerna.

Kompoziti s metalnom matricom se odlikuju iznimno dobrim mehaničkim svojstvima. Prednost metalne matrice je da provodi struju i toplinu te ima dobru žilavost i čvrstoću. Osnovni razlog zbog kojeg se ojačavaju metalne matrice je poboljšanje mehaničkih svojstava pri povišenim temperaturama.

Ojačavanjem metalne matrice ojačalima u obliku čestica povišuje se specifična čvrstoća i specifična krutost te poboljšava otpornost puzanju. Značajna prednost je što ovi kompoziti omogućuju upotrebu pri znatno višim radnim temperaturama (višim od 700 °C), no uz vrlo visoku cijenu proizvodnje koja je uvjetovana iznimno kompliciranim postupcima izrade njihova je uporaba prilično ograničena.

Prednosti metalne matrice su:

- vrlo visoka čvrstoća i krutost uz vrlo nisku gustoću,
- visoka toplinska i električna vodljivost,
- vrlo dobra otpornost na trošenje,
- vrlo dobra svojstva pri visokim temperaturama.

Nedostaci metalne matrice su:

- komplicirana proizvodnja,
- vrlo visoka cijena - cijena će padati sa širenjem primjene,
- nedovoljno podataka o svojstvima materijala,
- loša recikličnost.

Keramičkoj matrici je glavni zadatak da izdrži abrazivna djelovanja odnosno da ima zadovoljavajuću otpornost na trošenje i da štiti vlakna od oksidacije i oštećenja.

Prednosti keramičke matrice su:

- visoka tvrdoća i čvrstoća,



- mala masa,
- otpornost na trošenje,
- visoka krutost - elastičnost,
- vrlo dobra električna izolacija,
- dobra mehanička otpornost pri visokim temperaturama,
- postojanost prema koroziji.

Nedostatci keramičke matrice su:

- sklonost krhkom lomu zbog male žilavosti,
- mala žilavost,
- niska otpornost toplinskom umoru,
- visoki troškovi sirovina i postupaka oblikovanja.

Polimerna matrica se najčešće upotrebljava u zrakoplovnoj industriji zbog niza prednosti od kojih se mogu izdvojiti:

- mala gustoća,
- izuzetna otpornost na koroziju,
- dobra žilavost,
- dobra toplinska i elektroizolacijska svojstva,
- ekonomski isplativa proizvodnja velikog broja dijelova složenog oblika.

Od polimera se izrađuju razni konstrukcijski dijelovi za unutarnje uređenje zrakoplova, a često se koriste i kao materijal za zvučnu i toplinsku izolaciju. Polimerna matrica raspoređuje opterećenje kompozitnog materijala na svako pojedino vlakno, a ujedno vlakna štiti od

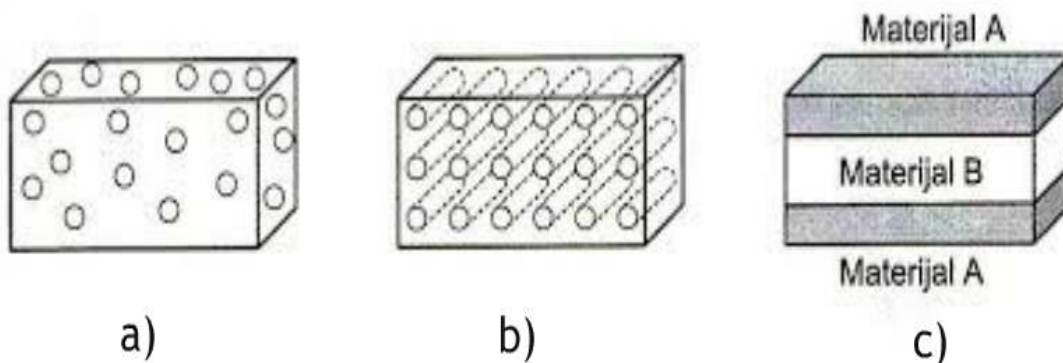
oštećenja i udarca. Ovakva kombinacija kao rezultat ima dobivanje materijal visoke čvrstoća i krutosti, male gustoće i dobre postojanosti na atmosferske utjecaje.

## 2.3. Ojačalo

Uloga ojačala je da bude nosivi element kompozita i da osigura visoku elastičnost - krutost te otpornost na trošenje.

Prema obliku ojačala (slika 3), kompoziti mogu biti:

- a) kompoziti ojačani česticama,
- b) kompoziti ojačani vlaknima,
- c) strukturni kompoziti - slojeviti kompoziti ili laminati,  
- sendvič konstrukcije.



Slika 3. Osnovni tipovi kompozita prema obliku ojačala

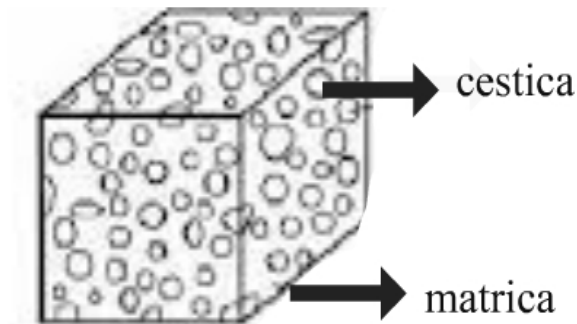
a) kompozit s česticama, b) kompozit s vlaknima, c) slojeviti kompozit

Izvor: <https://ironlady003.files.wordpress.com/2014/05/1-001.jpg>

### 2.3.1. Kompoziti ojačani česticama

Kompoziti ojačani česticama sadrže matricu u koju su ugrađena ojačala od tvrdog i krhkog materijala, jednoliko raspoređenih u matrici koje je prikazano na slici 4. Razlikuju se kompoziti s velikim česticama i kompoziti ojačani vrlo malim česticama (10-250 nm).

Kompoziti s česticama općenito su izotropni, što znači da su njihova svojstva jednaka u svim smjerovima te ovise o promjeru čestica.



Slika 4. Kompozit ojačan česticama

Izvor: [https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTZqd2PidcJQaPsKsa\\_JEZ9oEkbUhkc\\_ibXEWk9UujsDhRJaB8TGA](https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTZqd2PidcJQaPsKsa_JEZ9oEkbUhkc_ibXEWk9UujsDhRJaB8TGA)

### 2.3.2. Kompoziti ojačani vlaknima

Kompoziti ojačani vlaknima građeni su od matrice čija su ojačala napravljena od čvrstog, krutog i krhkog vlakna te su oni glavni nositelji opterećenja. Onovni zadatci vlakna su da osiguraju čvrstoću, krutost, toplinsku stabilnost, električnu vodljivost (izolaciju) te da preuzmu opterećenje (ona nose 70-90 % opterećenja), a zbog njihove visoke čvrstoće mogu zaustaviti širenje pukotine. Na slikama 5 i 6 prikazani su kompoziti ojačani vlaknima te razni oblici vlaknastih ojačala. Od osnovnih vrsta matrica najčešće se koristi polimerna matrica ojačana staklenim ili ugljičnim vlaknima.

Staklena vlakna pogodna su za uporabu kompozita u zrakoplovstvu zbog male težine, nezapaljivosti i ograničenosti prema gorivosti. Proizvode se najčešće od silicijevog dioksida ( $\text{SiO}_2$ ) različitim postupcima i u pravilu imaju slabija mehanička svojstva od ugljičnih vlakana. Vrlo su raširena u primjeni kod mehanički manje zahtjevnih konstrukcija zbog njihove niže cijene. Staklena vlakna su bijele ili prozirne boje, visoke su čvrstoće, ali nisu osobito kruta te ne mogu pružiti krutost koja je potrebna za konstrukcije nekih dijelova zrakoplova.

Ugljična vlakna danas se najčešće rabe za ojačanje polimernih kompozita kod mehanički najopterećenijih zrakoplovnih konstrukcija. Razlog tome je što ugljična vlakna imaju visoku čvrstoću i elastičnost koja se zadržava i pri višim temperaturama, otporna su na vlagu i kiseline te su relativno jeftini postupci proizvodnje vlakana i kompozita.

Imaju najveću krutost od svih komercijalno dostupnih vlakna, vrlo visoku čvrstoću, odličnu otpornost na koroziju, puzanje i zamor materijala te se stoga u velikoj mjeri koriste u zrakoplovnoj industriji.

Ugljični kompoziti su kompozitni materijali u kojima su matrica i ojačalo od ugljika. Radi se o relativno novim i vrlo skupim materijalima, a razlog visoke cijene je u vrlo složenom postupku proizvodnje. Ovi materijali mogu podnijeti vrlo visoke temperature. Bez ikakvih problema mogu biti izloženi temperaturi od 1700 °C. Osim toga pokazuju nisku toplinsku rastezljivost i visoku toplinsku vodljivost. Njihov osnovni nedostatak je sklonost oksidaciji pri visokim temperaturama. Primjenjuju se u raketnim motorima i konstrukcijama suvremenih vojnih zrakoplova.

Ugljična vlakna imaju relativno visoku čvrstoću i krutost te nisku gustoću, ali i visoku cijenu koja često ograničava njihovu primjenu. Nasuprot njima staklena vlakna imaju lošija mehanička svojstva, ali im je cijena znatno povoljnija. Kombiniranjem spomenutih vlakana dobiva se kompozit više čvrstoće i žilavosti te relativno povoljne cijene.

Posebnu skupinu čine borova vlakna koja su sama po sebi kompozit obzirom je bor posebnim postupkom nanesen na ugljično vlakno. Borova su se vlakna koristila u nekim od prvih aviona u kojima su upotrijebljeni kompoziti. Zbog vrlo visoke tvrdoće bora, ovi se kompoziti vrlo teško naknadno obrađuju, što je uz visoku cijenu, glavni razlog što su ih u zrakoplovnim konstrukcijama u potpunosti istisnuli kompoziti s ugljičnim vlaknima.

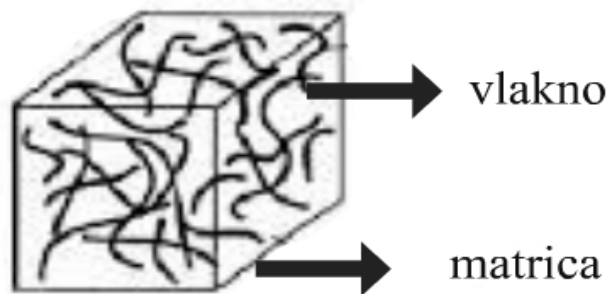
Postoje još i hibridni kompoziti koji se dobivaju uporabom više vrsta vlakana, kao ojačala u matrici. Velika prednost ovakvih kompozita je znatno bolja kombinacija svojstava nego što je to kod kompozita ojačanih samo jednom vrstom vlakana. Postoje razne kombinacije vlakana i matrica, ali ipak najčešće su ugljična i staklena vlakna u polimernoj matrici. Kombiniranjem spomenutih vlakana dobiva se kompozit više čvrstoće i žilavosti, te relativno povoljne cijene.

Značajna primjena hibridnih kompozita susreće se kod zrakoplova Boeing gdje se koriste za izradu konstrukcijskih elemenata oplate. U tablici 1 su navedeni primjeri hibridnih kompozita i njihova svojstva.

Tablica 1. Svojstva hibridnih kompozita

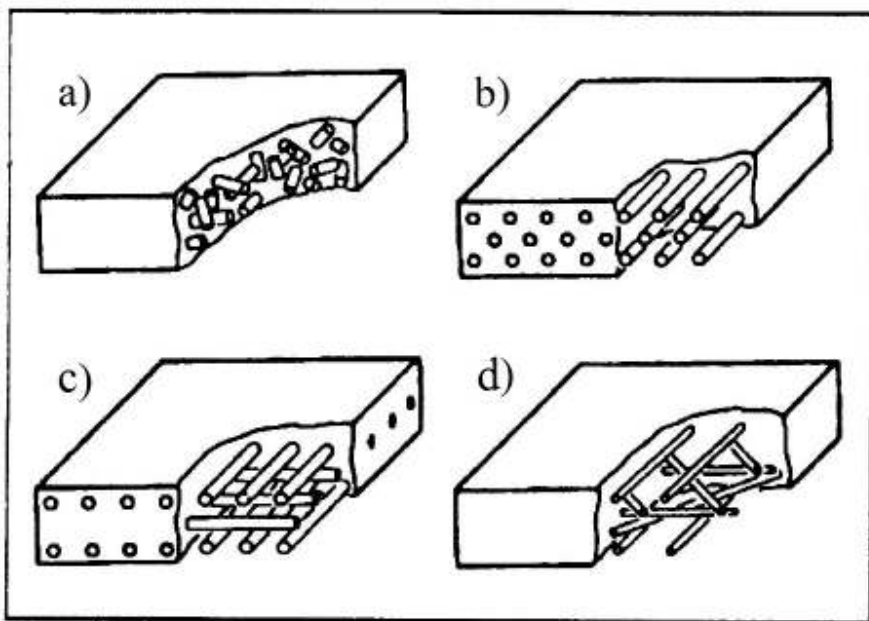
<b>Kompozit s ugljičnim vlaknima</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dobra žilavost i vlačna čvrstoća od aramida;</li> <li>- dobra tlačna i vlačna čvrstoća od ugljičnih vlakana;</li> <li>- niska gustoća ali relativno visoka cijena</li> </ul>
<b>Kompozit sa staklenim vlaknima</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mala gustoća, dobra žilavost i vlačna čvrstoća od aramida;</li> <li>- tlačna i vlačna čvrstoća od stakla;</li> <li>- niska cijena</li> </ul>
<b>Kompozit s ugljičnim i staklenim vlaknima</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dobra tlačna i vlačna čvrstoća, krutost i niska gustoća od ugljičnih vlakana;</li> <li>- niska cijena</li> </ul>

Izvor: [http://www.academia.edu/11695623/Materijali\\_u\\_vazduhoplovstvu](http://www.academia.edu/11695623/Materijali_u_vazduhoplovstvu)



Slika 5. Kompozit ojačan vlaknima

Izvor: [https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTZqd2PidcJQaPsKSa\\_JEZ9oEkbUhkc\\_ibXEWk9UujsDhRJaB8TGA](https://encrypted-tbn2.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTZqd2PidcJQaPsKSa_JEZ9oEkbUhkc_ibXEWk9UujsDhRJaB8TGA)



Slika 6. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačala

- a) kratka
- b) duga
- c) duga, u dva međusobna pravca
- d) duga, isprepletana

Izvor: <https://ironlady003.files.wordpress.com/2014/05/3-001-1.jpg>

### 2.3.3. Strukturni kompoziti

Strukturni kompoziti dijele se na slojevite kompozite ili laminate te na sendvič konstrukcije.

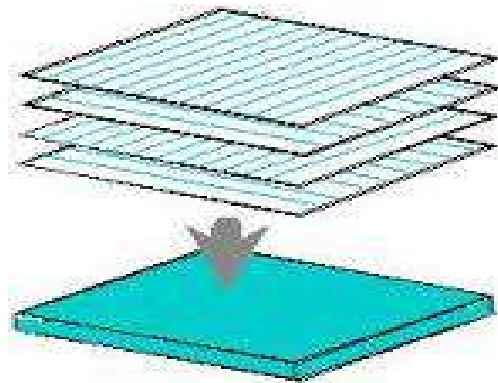
Slojeviti kompoziti ili laminati (slika 7) su posloženi slojevi materijala međusobno povezani organskim ljepilom. Prednost im je što imaju malu masu, dobru žilavost te otpornost na koroziju.

Laminati se sastoje od više slojeva ojačala povezanih u matricu. Različitom orijentacijom pojedinih slojeva mogu se bitno smanjiti nedostaci linearne orijentiranosti kompozita ojačanih vlaknima. Slojevi osiguravaju najbolja svojstva u smjeru djelovanja opterećenja čime se ostvaruje smanjenje materijala, a time i ušteda na težini.

U zrakoplovstvu se često rabe slojeviti kompoziti poznati kao "Glare" laminati (e. GLAss-REinforced fibre metal laminate). Takvi laminati sadrže aluminijske limove dodatno ojačane staklenim vlaknima. Ukoliko se u tim limovima javi pukotina, snop staklenih vlakana uspješno premošćuje pukotinu i na taj način usporava ili sprječava njeno širenje.

"Glare" laminati masovno su zastupljeni u izradi Airbusova zrakoplova A380 gdje se rabe za dijelove oplata trupa zrakoplova, za bočne panele (ploče), gornje dijelove krila, te krmene dijelove trupa.

Ugrađeni laminati sadrže četiri ili više aluminijska lima debljine 0,38 mm između kojih se nalazi vezni sloj smolom natopljenih staklenih vlakana. Uporabom ovakvih laminata ostvarena je značajna ušteda na težini zrakoplova, čak do 30% u odnosu na klasične aluminijske legure.

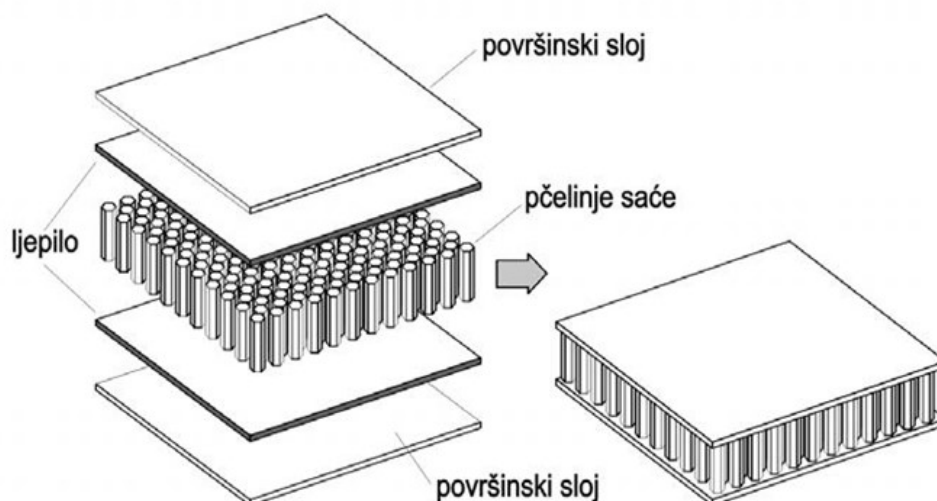


Slika 7. Slojeviti kompozit - laminat

Izvor: [http://repozitorij.fsb.hr/5050/1/Crnčević\\_2016\\_zavrzni\\_prediplomski.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/5050/1/Crnčević_2016_zavrzni_prediplomski.pdf)

Sendvič konstrukcije sastoje se od tankih vanjskih slojeva i laganog srednjeg sloja koji služi za popunjavanje. Ne ovise o matrici već o geometrijskom rasporedu elemenata konstrukcije. Jezgra je građena od pjenastog polimera i anorganskog cementa. Niti materijal za popunjavanje niti vanjski slojevi ne moraju biti ni čvrsti ni kruti, ali će sendvič imati oba svojstva.

Slika 8 prikazuje strukturu sendvič konstrukcije u obliku pčelinje saće koja se primjenjuje u zrakoplovstvu, a sadrži aluminijsku jezgru oblika saća položenu između tankih vanjskih slojeva (limova ili laminata). Time se dobiva čvrst, krut i lagan sendvič.



Slika 8. Struktura u obliku pčelinjih saća koja se primjenjuje u zrakoplovstvu

Izvor: [http://repozitorij.fsb.hr/1424/1/07\\_07\\_2011\\_ZAVRSNI\\_RAD\\_Marija\\_Biscan.pdf](http://repozitorij.fsb.hr/1424/1/07_07_2011_ZAVRSNI_RAD_Marija_Biscan.pdf)

Kompozitni sendviči u obliku saće široko se upotrebljavaju kod oplata krila, trupa i repa zrakoplova odnosno u izradi svih onih konstrukcijskih elemenata koji moraju biti visoke čvrstoće i visoke krutosti te male mase. Oko 100 takvih aluminijskih sendvič panela korišteno je kod Airbusova zrakoplova A380.



### 3. IZBOR I SVOJSTVA KOMPOZITNIH MATERIJALA

Kako se danas u zrakoplovnoj industriji masovno koriste kompozitni materijali, javlja se i potreba za poboljšanjem performansi zrakoplova, uz što nižu cijenu, na način da se smanjuju ukupni troškovi materijala. Stoga je potrebno dobro postaviti kriterije i zahtjeve oko izbora materijala.

Osnovna svojstva materijala koja opisuju te zahtjeve i kriterije su:

- a) čvrstoća,
- b) krutost,
- c) otpornost na koroziju,
- d) lomna žilavost,
- e) mehanička otpornost pri povišenim i visokim temperaturama,
- f) sigurnost.

#### a) Čvrstoća

Materijal od kojeg se izrađuju dijelovi zrakoplova mora biti odgovarajuće mehaničke otpornosti kako bi mogao izdržati razna opterećenja. Tu mehaničku otpornost u uvjetima djelovanja konstantnog opterećenja određuje čvrstoća materijala. Čvrstoću i krutost moguće je postići ojačalima u obliku staklenih i ugljičnih vlakana.

#### b) Krutost

Krutost možemo definirati kao otpornost na deformaciju. Da bi se spriječilo izvijanje dijelova zrakoplovnih konstrukcija materijal mora biti ne samo čvrst već i krut. Krutost materijala određuje modul elastičnosti. Što je čvrstoća manja niže su i vrijednosti elastičnosti te materijal pokazuje manju krutost. Kompozitne materijale općenito karakterizira visok modul elastičnosti, posebice ako se radi o visokočvrstim i visokokrutim ugljičnim vlaknima kao ojačalima.

c) Otpornost na koroziju

Korozija predstavlja spontano razaranje materijala nastalo djelovanjem vanjskih sila, čime se narušavaju njihova mehanička i fizikalna svojstva. Stoga materijali zrakoplovnih konstrukcija moraju biti postojani na koroziju.

d) Lomna žilavost

Još jedan bitan zahtjev koji se postavlja na zrakoplovni materijal jest otpornost prema pojavi i širenju pukotina. Materijal zrakoplovnih konstrukcija mora biti otporan na naglo širenje pukotina da bi se izbjegli različiti lomovi koji mogu uzrokovati neželjeno rušenje zrakoplova. Osobito je opasno naglo širenje pri kojem pukotina napreduje velikom brzinom jer se lom teško može predvidjeti. Iz tog razloga važno je poznavati veličinu naprezanja. Na temelju vrijednosti lomne žilavosti može se provjeriti pouzdanost konstrukcije.

e) Mehanička otpornost pri povišenim i visokim temperaturama

Tijekom uporabe neki dijelovi zrakoplova kao što su oplata, motor i turbina izloženi su temperaturama i višim od 1000 °C. Stoga konstrukcijski materijali moraju zadržati mehaničku otpornost pri tako visokim temperaturama. Polimerni su kompoziti u pravilu primjenjivi do temperature 250 °C dok su kompoziti metalne matrice u znatnoj prednosti jer su primjenjivi i do 1600 °C. Ugljični kompoziti, primjenjivi su u području najviših temperatura.

f) Sigurnost

Kako je već istaknuto materijali zrakoplovnih konstrukcija moraju biti čvrsti i otporni na pojavu deformacije kao i na širenje pukotina. Sigurnost ili pouzdanost konstrukcijskog dijela iskazuje se kroz umnožak vrijednosti ova dva svojstva.

### **3.1. Izdavanje certifikata o plovidbenosti zrakoplova**

Za izdavanje certifikata o plovidbenosti zrakoplova europska agencija za sigurnost propisala je određene zahtjeve.

Potrebno je osigurati da primjena kompozitnih materijala ne naruši navedenu razinu sigurnosti. Posebna se pozornost treba dati i kontroli proizvedenog materijala te načinu na koji se materijal nakon obrade dostavlja u tvornicu na daljnju proizvodnju.

Također, mora se obratiti pozornost na otpornost (izdržljivost) strukture u kriznim uvjetima. To se provodi testovima u kojima se pokazuje izdržljivost strukture kada nosi maksimalni teret bez dodavanja sigurnosnih faktora. Mehaničkim, fizičkim i kemijskim testovima materijala dokazuje se njihova čvrstoća, trajnost i pouzdanost.

Za kompozitne materijale, za razliku od tradicionalnih primjenjuju se različiti načini ispitivanja te je zbog toga bitno pratiti razvoj te vrste materijala.

## 4. PREDNOSTI I NEDOSTATCI KOMPOZITNIH MATERIJALA

### 4.1. Prednosti

- Prednosti kompozitnih materijala su prije svega mala težina što je veoma važno u zrakoplovstvu jer što je težina manja, veća je učinkovitost utrošenog goriva, a time je i veći domet.
- Također jedna od prednosti je i izvrsna izdržljivost na zamor pri opterećenjima.
- Kompozitni materijali imaju i visoku temperaturnu otpornost i izvrsno upijaju radarske zrake, a trupovi zrakoplova koji su izrađeni od kompozita omogućuju veće tlačno opterećenje.
- Kompozitni materijali su izrazito dugotrajni što dokazuju i primjeri koji su u uporabi preko 50 godina.
- U odnosu na metale kompoziti imaju malu ili nikakvu plastičnost dok se metali uslijed visokih opterećenja deformiraju i lome.
- Nadalje, kompozitni materijali, za razliku od metala, mogu osigurati odnos čvrstoće i težine i do 20%.
- Usred termičkih djelovanja kompoziti su otporniji pri opterećenjima jer gotovo da nemaju termičko širenje te porastom temperature zadržavaju prvobitni oblik.
- Prednosti kompozitnih materijala su i što je tijekom samog postupka proizvodnje moguće spajanje dijelova. Prilikom naknadne obrade troškovi su mali.
- Otporni su na koroziju, dugotrajni, a u ekstremnim radnim uvjetima imaju dimenzijsku stabilnost.
- Kompozitni materijali koji ne sadrže metale nisu magnetični pa ih se može koristiti u okolini osjetljivih elektronskih elemenata. Uz to nisu električni vodljivi pa mogu biti u doticaju sa elektronikom.

## 4.2. Nedostaci

Usprkos čvrstoći i maloj specifičnoj masi kompozitni materijali imaju i neke nedostatke. Pojedini materijali apsorbiraju vlagu pa je teško pronaći oštećenja na njihovoj strukturi. Cijena proizvodnje može biti izuzetno visoka zbog skupih strojeva i samog načina izrade.

Također kompozitni materijali su dosta krhki pa se prilikom popravka javljaju određeni problemi kao što su:

- veliki gubitak vremena potreban da bi se materijal zagrijao, stvrdnuo i ohladio,
- poseban transport i skladištenje zbog određenog vijeka trajanja.

Još jedan nedostatak je i taj što rad s kompozitima može imati štetan utjecaj na zdravlje čovjeka i okoline ako se radi o kompozitima sa ugljičnim vlaknima jer su u tom slučaju električki vodljivi te mogu reflektirati radio valove.

## **5. PRIMJENA KOMPOZITNIH MATERIJALA U ZRAKOPLOVSTVNOJ INDUSTRIJI**

Primjenom kompozita u zrakoplovstvu značajno se smanjila masa zrakoplova čime je ostvarena i manja potrošnja goriva te se povećala nosivost na razinu niže mase što je povoljno utjecalo na smanjenje troškova.

Primjena kompozitnih materijala uvelike raste te je poboljšanjem strukturnih svojstava kompozita moguće ispuniti vrlo kompleksne konstrukcijske zahtjeve.

Kompoziti se najviše primjenjuju u izradi sljedećih elemenata zrakoplova:

- oplate,
- elise,
- podne ploče i grede,
- lopatice ventilatora mlaznog motora,
- upravljačke površine,
- krilo i trup.

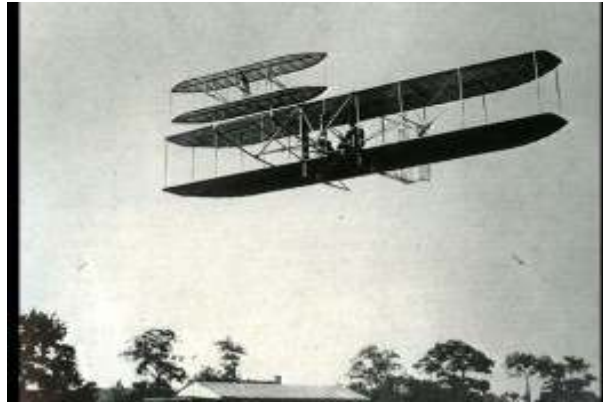
Kompozitne strukture zrakoplova moraju se redovito održavati pregledom i eventualnim popravkom pojedinih dijelova kompozita. Naprednom opremom moguće je otkriti šupljine, oštećenja ljepljenih spojeva elemenata te nastale pukotine u kompozitu. Veći elementi pregledavaju se rendgenom, dok se manji dijelovi provjeravaju ručnim sondama.

U zrakoplovstvu se također koristi i pregled zasnovan na zagrijavanju elemenata čime se toplina širi te ukoliko postoje nepravilnosti vrlo se lako mogu vidjeti šupljine i pukotine.

### **5.1. Razvoj zrakoplovne industrije**

Napretkom znanosti i razvojem industrije započinje razvoj aerodinamičnih zrakoplova u kojem su veliku ulogu odigrala braća Wright. Oni su 1903. izveli prvi let zrakoplovom na

motorni pogon. Preletjeli su 37 metara za 12 sekundi. Zrakoplov je bio napravljen od tradicionalnih materijala čvrstog i krutog drva te čeličnih žica i cijevi. Na slici 9 prikazan je njihov zrakoplov Flyer.



Slika 9. Zrakoplov Flyer

Izvor: <http://www.air-journal.fr/wp-content/uploads/air-journal-freres-wright-avion-flyer-265x199.jpg>

Općeniti značaj zrakoplova uočen je tijekom prvog svjetskog rata kada je brzina zrakoplova narasla preko dva puta, a snaga motora četiri puta. Prešlo se na metalnu konstrukciju i primjenu metalnih elisa. U razdoblju drugog svjetskog rata zrakoplovi su imali veliku ulogu u vojnom pogledu kao vojno oružje, a u njih su se počeli ugrađivati materijali koje susrećemo i danas. Uskoro se prešlo na izradu motora zrakoplova aluminijskim legurama čime se reducirala težina zrakoplova i ostvarilo bolje uvođenje topline.

Prvi predstavnici kompozitnih materijala bili su polimeri ojačani staklenim vlaknima koji su se prvotno koristili za manje opterećene elemente zrakoplova, ali zahvaljujući kontinuiranom napretku počinju se rabiti i za složenije konstrukcijske elemente poput oplata krila i trupa zrakoplova.

Jedna od prvih primjena zabilježena je prije 40 godina kod borbenih zrakoplova F14 (slika 10) i F 15. Vlaknima ojačana polimerna smola koristila se za izradu oplata repa. U početku je udio kompozita bio vrlo mali tako da je kod zrakoplova F14 iz 1970. godine on iznosio samo oko 1 %. Osam godina kasnije uporaba kompozita toliko je porasla da je njihov udjel narastao na skoro 19 % kod zrakoplova F18 (slika 11). Krila i rep ovog zrakoplova najvećim dijelom su izvedeni od kompozita matrice s ugljičnim ojačanjem.



Slika 10. Zrakoplov F – 14

Izvor: <http://fas.org/man/dod-101/sys/ac/f-14-plane9.jpg>



Slika 11. Zrakoplov F - 18

Izvor: [http://www.wallpaperup.com/248306/F-18\\_fighter\\_jet\\_military\\_plane\\_airplane\\_usa\\_\(68\).html](http://www.wallpaperup.com/248306/F-18_fighter_jet_military_plane_airplane_usa_(68).html)

Udjeli pojedinih skupina materijala s vremenom su se mijenjali na račun povećane potrošnje kompozita i titanovih materijala te istovremenog smanjenja potreba za aluminijskim legurama.

Kod zrakoplova F-22 (slika 12) iz 1990. godine kompozitni materijali masovno su korišteni u izradi oplata trupa i krila tako da čine 24% ukupne težine konstrukcije zrakoplova.





Slika 12. Zrakoplov F - 22

Izvor: <http://www.generalhobby.com/images/all-models/f22-starmax-64mm-3.jpg>

Nakon drugog svjetskog rata započinje razvoj civilnog zrakoplovstva i tada započinje uvođenje kompozitnih materijala no u početku riječ je bila samo o primjeni ograničenoj na neke dijelove okomitog repa i na rub krila tj. na one elemente koji su bili manje opterećeni. Neki od putničkih zrakoplova tog vremena i danas uspješno lete.

Primjer takvog zrakoplova je Boeing 707 napravljen 50tih godina prošlog stoljeća koji je dan danas u uporabi zahvaljujući pouzdanosti i trajnosti ugrađenog materijala. Ovaj zrakoplov, kao i kasnije razvijeni Boeing 727, 747, te 777 rađeni su od aluminijskih legura visoke čvrstoće i male gustoće. Zahvaljujući razvoju i poboljšavanju aluminijskih materijala te primjeni kompozitnih materijala ostvarene su mnoge prednosti kao što su brzina, veličina zrakoplova, težina, sigurnost i trajnost. Kronološki slijed zrakoplova Boeing prikazan je na slici 13.



Slika 13. Kronološki slijed zrakoplova Boeing

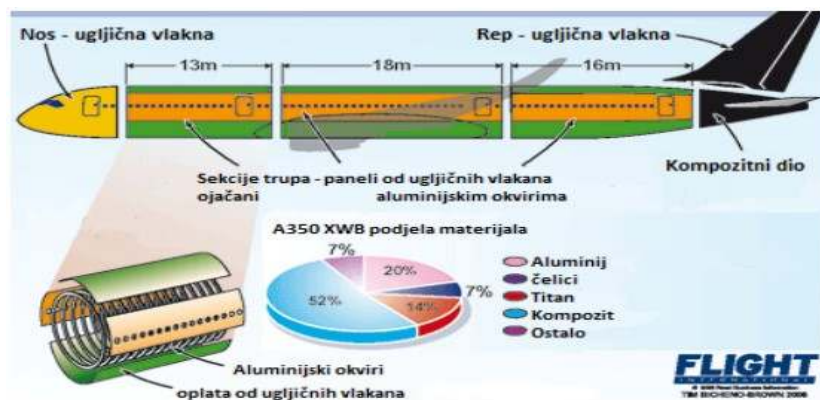
Izvor: [http://repositorij.fsb.hr/1318/1/20\\_05\\_2011\\_Danijel\\_Tomasic\\_-\\_Diplomski\\_rad\\_-\\_PDF\\_-\\_600\\_dpi.pdf](http://repositorij.fsb.hr/1318/1/20_05_2011_Danijel_Tomasic_-_Diplomski_rad_-_PDF_-_600_dpi.pdf)

Najbolji primjer velikog korištenja kompozita u gradnji ističe se Boeing 787 Dreamliner. To je zrakoplov čijih je 50% dijelova napravljeno od kompozitnih materijala, dok ostatak 50% čine legure aluminija, titana i čelika. Osnovna prednost mu je što je vrlo lagan, smanjena je buka te troši 20% manje goriva od sličnih zrakoplova. Zahvaljujući maloj potrošnji goriva može bez prekida preletjeti i udaljenosti do 15 750 km.

Osim Boeinga možemo spomenuti i zrakoplove tvrtke Airbus u čiju se gradnju kompozitni materijal ukomponirao još daleke 1983. U početku se polimerni kompozit koristio uglavnom u izradi kormila, zatim repa te podne obloge, dok su danas kompoziti široko zastupljeni u proizvodnji Airbusa A380, najvećeg zrakoplova na svijetu.

## 5.2. AIRBUS A380

Airbus A380 je najveći putnički zrakoplov na svijetu, s kapacitetom od 525 – 853 putnika i težinom od 590 tona, a proizveden je od europske tvrtke Airbus. Za vrijeme razvoja bio je poznat kao Airbus A3XX dok se danas često koristi naziv Superjumbo. Taj zrakoplov primjer je široke upotrebe kompozitnih materijala od kojih je izrađena cijelokupna gornja i donja oplata zrakoplova, pod gornje palube, upravljačke površine, rep te još mnogo konstrukcijskih elemenata. Osim polimernih kompozita primijenjeni su i metalni kompoziti ojačani staklenim vlaknima. Dok je većina trupa izrađena od aluminija, kompozitni materijali sadrže više od 20% mase strukture zrakoplova. Također tvrtka Airbus konstruirala je putnički zrakoplov A350 XWB koji je izgrađen od ukupno 53% kompozitnih materijala. Struktura tog zrakoplova prikazana je na slici 14.



Slika 14. Konstrukcijski materijal zrakoplova Airbus A350 XWB

Izvor: [http://3.bp.blogspot.com/\\_JcIe4EsmDYA/TP7ZbH398OI/AAAAAAAAAgU/uWv9tU2WEyg/s1600/A350\\_Layout.gif](http://3.bp.blogspot.com/_JcIe4EsmDYA/TP7ZbH398OI/AAAAAAAAAgU/uWv9tU2WEyg/s1600/A350_Layout.gif)

Slika 16 prikazuje prvi putnički zrakoplov A380 na kojem je središnja kutija krila izrađena od polimernog kompozita.

To je prvi Airbusov zrakoplov čiji je trup 100% izgrađen od kompozitnih materijala. Razlog tome je taj što za razliku od zrakoplova koji se sastoje većinom od metala on osigurava više električne otpornosti.

Na slici 15 vidljivi su najznačajniji kompozitni materijali korišteni u izradi Airbusa A380.

Glare laminat - metalni kompozit ojačan staklenim vlaknima,

GFRP kompozit - polimerni kompozit ojačan staklenim vlaknima,

QFRP kompozit - polimerni kompozit ojačan vlaknima kvarca,

CFRP kompozit - polimerni kompozit ojačan ugljičnim vlaknima,

Sendvič kompoziti – kompozitne konstrukcije u obliku pčelinje saće jačanog ugljičnim vlaknima.



Slika 15. Struktura zrakoplova Airbus 380

Izvor: <http://www.euroaviasevilla.es/compositesymposium/imagenes/9119.jpg>



Slika 16. Zrakoplov Airbus A380

Izvor: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/82/Airbus\\_A380\\_blue\\_sky.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/82/Airbus_A380_blue_sky.jpg)

### 5.3. Boeing 787 Dreamliner

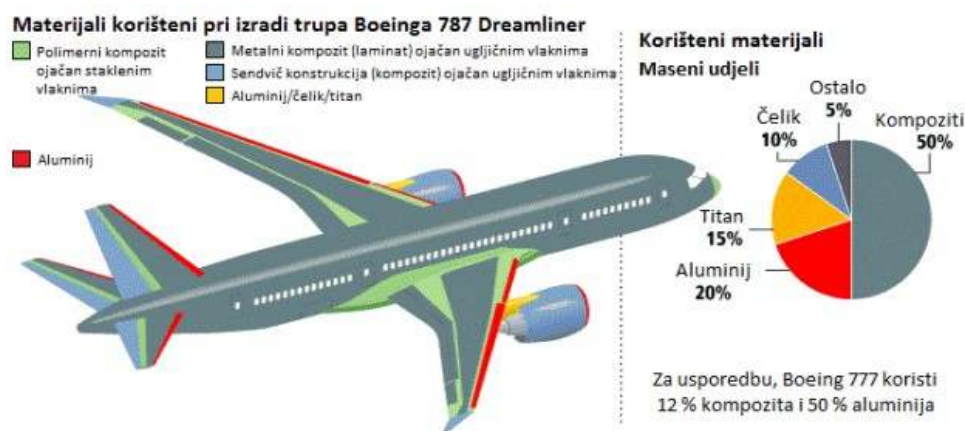
Slika 17 prikazuje zrakoplov Boeing 787 Dreamliner. To je američki širokotrupni zrakoplov s kapacitetom od 210 – 330 putnika. Najekonomičniji je zrakoplov izrađen do sada s potrošnjom goriva i do 20% manjom od ostalih zrakoplova u klasi. Njegova prednost nije u veličini (obzirom da je Airbus A380 i dalje najveći zrakoplov na svijetu) nego u korištenim materijalima i postupcima izrade.



Slika 17. Zrakoplov Boeing 787 Dreamliner

Izvor: [http://www.businessreviewcanada.ca/public/uploads/large/large\\_article\\_im156\\_Boeing-787-Dreamliner.jpg](http://www.businessreviewcanada.ca/public/uploads/large/large_article_im156_Boeing-787-Dreamliner.jpg)

Na slici 18 vidljivo je da je 50% dijelova izrađeno od kompozitnih materijala, a oko 80% trupa izrađeno je iz jednog komada smole ojačane ugljičnim vlaknima. Takav kompozit značajno je smanjio težinu zrakoplova te omogućio uštedu goriva i povećanje doleta. Sve kompozite Boeingu dostavlja Toray Industries, najveći svjetski proizvođač ugljičnih vlakana. Iskustvo s Boeingom 777 dokazalo je da kompozitni materijali zahtijevaju manji broj redovnih održavanja od nekompozitnih materijala. Naprimjer rep Boeinga 777 izrađen od kompozita 25% je veći od repa Boeinga 767 ali zahtjeva 35% manji broj sati održavanja. To je posljedica smanjenog rizika od korozije i zamora te se time smanjuju i ukupni troškovi održavanja.



Slika 18. Kompozitna struktura Boeinga 787 Dreamliner

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

#### 5.4. Bell-Boeing V-22 Osprey

Slika 19 prikazuje zrakoplov Bell-Boeing V-22 Osprey. To je višenamjenski vojni zrakoplov u čijoj je gradnji obilno uporabljen kompozitni materijal. Čak 44% izrađeno je od polimernih kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima, 4% od polimernih kompozita ojačanih staklenim vlaknima, 46% metala te 7% drugih materijala što je imalo za posljedicu 22% lakšu letjelicu nego da je izrađena u potpunosti od metala. Uporaba kompozitnih materijala povećava i sigurnost letjelice jer za razliku od iznenadnog pucanja metala, kod kompozitnih materijala pucanje se događa postupno čime se daje dovoljno vremena za uočavanje oštećenja.



Slika 19. Zrakoplov Bell-Boeing V-22 Osprey

Izvor: [http://www.flugzeuginfo.net/acimages/mv22b\\_mickbajcar.jpg](http://www.flugzeuginfo.net/acimages/mv22b_mickbajcar.jpg)

### **5.5. Trendovi primjene razvoja u zrakoplovnoj industriji**

Kompozitni materijali s pravom se smatraju materijali budućnosti koji će predstavljati glavni pravac inovacija. Analizom novih materijala dokazano je kako su bitno drukčijih svojstava od tradicionalnih materijala te su lakši, trajniji i pouzdaniji. Primjenom nano tehnologije proizvoditi će se još kvalitetniji materijali s još naprednijim svojstvima koja će pridonijeti i cijeni proizvodnje, eksploataciji zrakoplova te kao najbitnijem elementu povećanju sigurnosti zračne plovidbenosti.

## 6. ZAKLJUČAK

Rad predstavlja istraživanje primjene kompozitnih materijala u zrakoplovnoj industriji. Analizirani su dijelovi tih materijala, njihove prednosti i nedostaci te je ukazana i problematika u eksploataciji suvremenih zrakoplova izrađenih od kompozita te suvremene metode i ispitivanja svojstva koja bi omogućila što bolju sigurnost. Glavni izazov u zrakoplovnoj industriji je pronaći sve prednosti kompozitnih materijala nad tradicionalnim te ih iskoristiti u proizvodnji još efikasnijih i sigurnijih zrakoplova.

U odnosu na tradicionalne materijale kompoziti su manje osjetljivi na pojavu različitih oblika oštećenja što doprinosi njihovoj trajnosti, jednostavni su i jeftini za održavanje te su otporni na koroziju. Niska gustoća i mala masa jedni su od glavnih prednosti jer se time može ostvariti manja potrošnja goriva što povoljno utječe na troškovnu isplativost. Uporabom takvih materijala smanjivat će se i štetan utjecaj na okoliš što je danas vrlo važno.

Primjena kompozitnih materijala u zrakoplovnoj industriji uvelike raste i sve više zamjenjuje tradicionalne materijale jer otpornost koju posjeduju na mehaničke, kemijske i temperaturne uvjete ovu vrstu čini itekako poželjnom u zrakoplovnoj industriji. Neke procjene govore da udjel materijala u cijeni zrakoplova iznosi otprilike 60%. Iz tog razloga javlja se potreba za što intenzivnijim poboljšanjem struktura zrakoplova, uz istovremeno što nižu cijenu, na način da se smanjuju ukupni troškovi materijala. Buduća tehnologija kompozita pružat će materijale nižih cijena te će se raditi na poboljšanju proizvodne učinkovitosti.

Uglavnom, kompozitni materijali pokazali su dobra iskustva do sada te se za njih može reći da su materijali budućnosti za zrakoplovstvo, a njihovim će se razvojem u nano tehnologiji proizvoditi materijali naprednih svojstava koji su danas još uvijek vrlo skupi za primjenu.

## LITERATURA

1. Blažeković, K.: Tehnologijske inovacije u zrakoplovnoj konstrukciji – interna skripta, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2012.
2. Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu – interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.
3. Filetin, T., Kovačiček, F., Indorf, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2002.
4. Krajina, M.: Materijali u vazduhoplovstvu – interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.
5. Meić Sidić, A.: Primjena kompozitnih materijala u zrakoplovnim konstrukcijama – interna skripta, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015.
6. Mihaljević, T.: Mehanička svojstva kompozita s polimernom matricom – interna skripta, Stručni studij strojarstva Veleučilišta u Karlovcu, Karlovac, 2015.
7. Smojver, I.: Mehanika kompozitnih materijala, FSB, Zagreb, 06/2007
8. Tomašić, D.: Primjena kompozitnih tvorevina u zrakoplovnoj industriji – interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2011.

### INTERNET IZVORI:

<https://ironlady003.wordpress.com/2014/05/12/kompozitni-materijali/>

[http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zav\\_teh\\_meh/katedre/cvr\\_kon/Pages/osoblje\\_files/Lanc/MK\\_predavanja\\_Lanc.pdf](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zav_teh_meh/katedre/cvr_kon/Pages/osoblje_files/Lanc/MK_predavanja_Lanc.pdf)

<http://www.boeing.com/>

<https://hr.wikipedia.org/wiki/Materijal>

<http://www.planeta.rs/49/10aeronautika.htm>

<http://www.airbus.com/>



## POPIS SLIKA

Slika 1. Raspored matrice i ojačala u kompozitu .....	6
Slika 2. Prikaz veze između matrice i vlakana .....	6
Slika 3. Osnovni tipovi kompozita prema obliku ojačala.....	9
Slika 4. Kompozit ojačan česticama.....	10
Slika 5. Kompozit ojačan vlaknima.....	12
Slika 6. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačala .....	13
Slika 7. Slojeviti kompozit - laminat .....	14
Slika 8. Struktura u obliku pčelinjih saća koja se primjenjuje u zrakoplovstvu.....	15
Slika 9. Zrakoplov Flyer.....	22
Slika 10. Zrakoplov F – 14.....	23
Slika 11. Zrakoplov F - 18.....	23
Slika 12. Zrakoplov F - 22.....	24
Slika 13. Kronološki slijed zrakoplova Boeing.....	24
Slika 14. Konstrukcijski materijal zrakoplova Airbus A350 XWB .....	25
Slika 15. Struktura zrakoplova Airbus 380 .....	26
Slika 16. Zrakoplov Airbus A380 .....	27
Slika 17. Zrakoplov Boeing 787 Dreamliner .....	27
Slika 18. Kompozitna struktura Boeinga 787 Dreamliner .....	28
Slika 19. Zrakoplov Bell-Boeing V-22 Osprey.....	29

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva hibridnih kompozita.....	12
--	----