

# Primjena kompozitnih materijala u konstrukciji zrakoplova

---

Šimić, Josip

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

*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:119:201393>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-28**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository](#)



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **ZAVRŠNI RAD**

**PRIMJENA KOMPOZITNIH MATERIJALA U  
KONSTRUKCIJI ZRAKOPLOVA**

**APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS  
IN AIRCRAFT CONSTRUCTION**

Mentor: prof. dr. sc. Andrija Vidović

Student: Josip Šimić

JMBAG: 0135253720

Zagreb, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI  
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 5. svibnja 2023.

Zavod:           Zavod za zračni promet  
Predmet:        Osnove tehnike zračnog prometa

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 7268

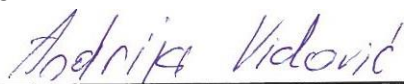
Pristupnik:    Josip Šimić (0135253720)  
Studij:        Promet  
Smjer:         Zračni promet

Zadatak:       Primjena kompozitnih materijala u konstrukciji  
                  zrakoplova

### Opis zadatka:

U uvodnom dijelu potrebno je definirati predmet istraživanja, svrhu i cilj istraživanja, dati pregled dosadašnjih istraživanja razmatrane tematike te predočiti strukturu rada prema poglavljima. Klasificirati kompozitne materijale i prikazati načine slaganja vlakana i matrica. Na primjeru konkretnih zrakoplova prikazati za koje dijelove konstrukcije se isti upotrebljavaju i navesti prednosti i nedostatke u odnosu na konvencionalne materijale. Ukazati na specifičnosti korištenja kompozitnih materijala i istražiti zahtjeve plovidbenosti zrakoplova izrađenih od kompozitnih materijala. U zaključku prikazati rezultate istraživanja predmetne tematike u završnom radu.

Mentor:



prof. dr sc. Andrija Vidović

Predsjednik povjerenstva za završni ispit:



## SAŽETAK

U ovom završnom radu opisani su kompozitni materijali, njihova podjela, povijest, te prednosti i nedostaci kompozitnih materijala. Različite vrste kompozita odlikuju se specifičnim prednostima koje ih čine idealnim za upotrebu u konstrukciji zrakoplova. Kompoziti ojačani vlaknima i složeni kompoziti, poput laminata i sendvič konstrukcija, često se koriste u zrakoplovstvu. Osim toga, kompoziti ojačani česticama i hibridni kompoziti imaju svoje važno mjesto u konstrukciji zrakoplova. Primjeri poput putničkih zrakoplova Airbus A380 i Boeing B787, te višenamjenski borbeni zrakoplov Bell-Boeing V-22 Osprey prikazuju prednosti kompozitnih materijala u stvaranju naprednih zrakoplova.

**KLJUČNE RIJEČI:** kompozitni materijali; zrakoplovna konstrukcija; složeni kompoziti; hibridni kompoziti

## SUMMARY

This final paper describes composite materials, their classification, history, and advantages and disadvantages of composite materials are described in this final paper. Different types of composites have specific advantages that make them ideal for use in aircraft construction. Fiber-reinforced composites and complex composites, such as laminates and sandwich structures, are often used in aerospace. In addition, particle-reinforced composites and hybrid composites have their important place in aircraft construction. Examples such as the Airbus A380 and Boeing B787 passenger aircraft, and the Bell-Boeing V-22 Osprey multi-role combat aircraft show the benefits of composite materials in creating advanced aircraft.

**KEY WORDS:** composite materials; aircraft construction; complex composites; hybrid composites

# Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Općenito o kompozitnim materijalima .....	3
2.1 Povijesni razvoj kompozitnih materijala .....	3
2.2 Osnovna podjela kompozita .....	3
2.3 Prednosti kompozitnih materijala .....	4
2.4 Nedostatci kompozitnih materijala .....	4
3. Složeni i hibridni kompoziti u konstrukciji zrakoplova .....	6
3.1 Slojeviti kompoziti (laminati) .....	6
3.2 Sendvič konstrukcije .....	9
3.3 Hibridni kompoziti .....	10
4. Materijali vlakana i matrica u zrakoplovnoj konstrukciji .....	12
4.1 Vrste vlakana .....	12
4.2 Vrste matrica .....	14
5. Primjena kompozitnih materijala na modernim zrakoplovima .....	15
5.1 Airbus A380 .....	15
5.2 Boeing B787 Dreamliner .....	17
5.3 Bell-Boeing V-22 Osprey .....	19
6. Zahtjevi plovidbenosti zrakoplova izrađenih od kompozitnih materijala .....	21
6.1 Propisi za plovidbenost Europske Unije .....	22
6.2 Propisi za plovidbenost Sjedinjenih Američkih Država .....	23
7. Zaključak .....	25
Literatura .....	26
Popis slika .....	28
Popis tablica .....	29

# 1. Uvod

Kompozit ili kompozitni materijal je svaki materijal građen od dvije ili više međusobno čvrsto povezanih komponenti različitih svojstava sa jasnom granicom između komponenti. Glavni razlozi za razvijanje ovakve vrste materijala je potreba za materijalom koji je iznimno lagan u odnosu na druge materijale, te koji ima iznimnu čvrstoću, toplinsku postojanost i izrazito jaku otpornosti na pucanje. Takav materijal se pretežito koristi u zrakoplovnoj industriji gdje je ključno da materijali od kojih je izgrađena letjelica budu lagani, ali iznimno čvrstih struktura, omogućujući veću učinkovitost goriva i poboljšanu aerodinamiku letjelica. Kada je riječ o kompozitnim materijalima postoje mnoge vrste, od jednostavnijih kao što je armirani beton do složenijih sa različitim vrstama vlakana, poput staklenih i ugljičnih polimernih matrica. Ovaj rad će razmotriti različite varijante kompozitnih materijala, te njihovu iznimno važnu primjenu u zrakoplovstvu, uz konkretne primjere.

Predmet istraživanja rada je prikazati primjene kompozitnih materijala, njihovu povijest, podjelu, te koji su svi zahtjevi za plovidbenost zrakoplova izgrađenih od kompozitnih materijala. Svrha ovog istraživanja je istaknuti kako upotreba kompozitnih materijala doprinosi poboljšanju procesa konstrukcije zrakoplova, istovremeno analizirajući prednosti i nedostatke ovih materijala. Kroz ovu analizu, cilj je prikazati kako primjena kompozitnih materijala značajno unapređuje performanse, efikasnost te ekološku održivost zrakoplova, potičući razvoj suvremenih i učinkovitih letjelica.

Rad se sastoji od sedam poglavlja, kako slijedi:

1. Uvod
2. Općenito o kompozitnim materijalima
3. Složeni i hibridni kompoziti u konstrukciji zrakoplova
4. Materijali vlakana i matrica u zrakoplovnoj konstrukciji
5. Primjena kompozitnih materijala na modernim zrakoplovima
6. Zahtjevi plovidbenosti zrakoplova izgrađenih od kompozitnih materijala
7. Zaključak

U uvodnom dijelu predstavljen je predmet, svrha i cilj istraživanja, te je prikazana kompozicija rada.

U drugom dijelu rada istražen je povijesni razvoj kompozitnih materijala, njihova osnovna podjela prema materijalu matrice i ojačalu te istaknute su prednosti kao što su mala težina, visoka izdržljivost i otpornost na koroziju. Također, razmotreni su nedostaci kompozitnih materijala uključujući visoke troškove proizvodnje i potrebu za specijaliziranom opremom za popravke.

Treća cjelina rada istražuje primjenu složenih i hibridnih kompozita u konstrukciji zrakoplova. Prikazane su struktura i prednosti slojevitih kompozita (laminata) za smanjenje težine i povećanje izdržljivosti. Također, analizirana je sendvič konstrukcija za visoku krutost i izdržljivost te hibridni kompoziti, uključujući inovativne hibridne biokompozite, za bolje mehaničke osobine i održivost.

Četvrta cjelina rada istražuje materijale vlakana i matrica u zrakoplovnoj konstrukciji. Prikazane su različite vrste vlakana, uključujući karbonska, staklena, aramidna i vlakna od kvarca, te njihova svojstva i primjene u zrakoplovstvu. Također, analizirane su različite vrste matrica, kao što su polimerne, metalne i keramičke matrice, koje igraju ključnu ulogu u definiranju karakteristika kompozitnih materijala za zrakoplovne komponente.

U petoj cjelini rada prikazana je primjena kompozitnih materijala na modernim zrakoplovima. Istaknuta je njihova uloga u postizanju veće nosivosti, ekonomičnosti i ekološke prihvatljivosti. Analizirani su primjeri Airbusa A380 i Boeinga B787 Dreamliner-a te Bell-Boeing V-22 Osprey-a kao primjeri s visokim postotkom kompozitnih materijala u konstrukciji.

Šesta cjelina rada istražuje zahtjeve plovidbenosti za zrakoplove od kompozitnih materijala u Europskoj Uniji i Sjedinjenim Američkim Državama. Regulatorna tijela poput (engl. *European Union Aviation Safety Agency – EASA*) i Savezna uprava za zrakoplovstvo (engl. *Federal Aviation Administration – FAA*) postavljaju stroge standarde i smjernice za ispitivanje, certificiranje i zaštitu kompozitnih struktura kako bi osigurali sigurnost i pouzdanost zrakoplova.

U zaključku istraživanja, kompozitni materijali su istaknuti kao ključni za napredak i konstrukciju modernih zrakoplova, omogućujući visoke performanse, lagane i izdržljive strukture.

## 2. Općenito o kompozitnim materijalima

### 2.1 Povijesni razvoj kompozitnih materijala

Povijest upotrebe kompozita potječe iz 1500. godine prije Krista, kada su rani Egipćani i mezopotamski naseljenici koristili mješavinu blata i slame kako bi stvorili jake i izdržljive zgrade. Suvremena era kompozita počela je kada su znanstvenici razvili plastiku. Do tada su prirodne smole dobivene od biljaka i životinja jedini izvor ljepila i veziva. Ranih 1900.-ih godina razvijene su plastike kao što su polistiren, vinil, fenol i poliester [1].

Sedamdesetih godina prošlog stoljeća industrija kompozita počela je sazrijevati. Razvijene su bolje plastične smole i poboljšana vlakna za pojačavanje, te su u zadnje vrijeme razvijena i karbonska vlakna koja su sve više zamjenjivala dijelove napravljene od čelika. Daljnji razvoj usmjerio 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.

U sredinom 1960-ih i početkom 1970-ih godina, zrakoplovna industrija je počela inkorporirati kompozitne materijale, što je predstavljalo prekretnicu u razvoju visokih performansi zrakoplova. Inicijalno je primjena i napredak kompozitnih materijala bio zapažen u vojnom sektoru, dok je civilno zrakoplovstvo slijedilo sličan put, ali s opreznijim pristupom. Airbus je izrazito napredovao u korištenju kompozitnih materijala u civilnom zrakoplovstvu, posebno ističući primjenu kod repnih vertikalnih i horizontalnih stabilizatora na svojim A300 serijama [2].

### 2.2 Osnovna podjela kompozita

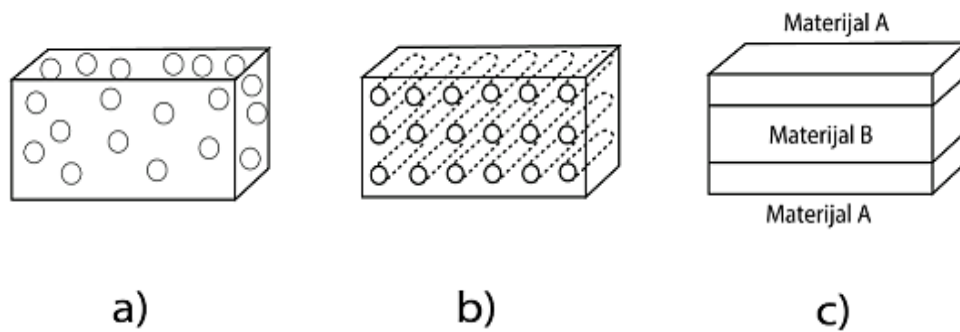
Kompoziti su višefazni materijali, što znači da u osnovi sadrže matricu i ojačalo. Matrica je kontinuirana faza, a ostale faze (ojačala) okružene su matricom [3].

Temeljna podjela kompozita prema materijalu matrice je slijedeća:

- kompoziti sa metalnom matricom (engl. *Metal Matrix Composites* - MMC),
- kompoziti sa keramičkom matricom (engl. *Ceramic Matrix Composites* - CMC) i
- kompoziti sa polimernom matricom (engl. *Polimer Matrix Composites* - PMC).

Na slici 1 prikazani su osnovni tipovi kompozitnih materijala prema vrsti ojačala: kompoziti ojačani česticama, kompoziti ojačani vlaknima i slojeviti kompoziti [4].





Slika 1. Osnovni tipovi kompozita: (a) kompoziti s česticama; (b) kompoziti s vlaknima; (c) slojeviti kompoziti

Izvor: [3]

## 2.3 Prednosti kompozitnih materijala

U usporedbi s konvencionalnim materijalima, kompoziti donose mnoge prednosti. Njihova niska masa posebno je ključna u zrakoplovstvu jer smanjuje potrošnju goriva, povećava kapacitet tereta te omogućuje veći dolet. Osim toga, kompoziti se ističu izvrsnom otpornošću na zamor pri dinamičkim opterećenjima te, ovisno o vrsti smole, pružaju visoku temperaturnu otpornost i efikasno apsorbiraju radarske zrake. Još jedna prednost je veća tlačna nosivost trupova zrakoplova izrađenih od kompozita.

Za razliku od metala, kompoziti su karakterizirani niskom ili nikakvom plastičnošću te pokazuju izuzetnu otpornost na koroziju, čineći ih trajnima. Oni koji ne sadrže metalne komponente nisu magnetični, što ih čini prikladnima za upotrebu blizu osjetljivih elektroničkih uređaja. Primjeri upotrebe kompozitnih materijala koji su u funkciji već više od 50 godina svjedoče o njihovoj iznimnoj dugotrajnosti. Kompozitni materijali u odnosu na konvencionalne materijale su mnogo skuplji, što zahtijeva pažljivo planiranje budućih projekata. Također, proces proizvodnje kompozita zahtijeva posebnu tehnologiju, što se razlikuje od proizvodnje konvencionalnih materijala [4].

## 2.4 Nedostatci kompozitnih materijala

Usprkos čvrstoći i maloj specifičnoj masi kompozitni materijali imaju i neke nedostatke. Cijena proizvodnje može biti izuzetno visoka zbog skupih strojeva, načina izrade, te nedostatka standardizirane metodologije za popravke oštećenih dijelova [5]. Kompozitni materijali, zbog svoje relativne krhkosti, predstavljaju izazov prilikom popravka iz sljedećih razloga:

- poseban transport i skladištenje zbog određenog vijeka trajanja
- vruće stvrdnjavanje materijala je neophodno uz odgovarajuću opremu
- gubitak vremena zbog zagrijavanja i stvrdnjavanja, te hlađenja materijala

Još jedan nedostatak je i taj što rad s kompozitima može imati štetan utjecaj na zdravlje čovjeka i okoline. Kompozitni materijali s ugljičnim vlaknima su električki vodljivi te mogu reflektirati radio valove, što u nekim situacijama može predstavljati nedostatak. S aspekta održavanja, veliki izazov kompozitnih materijala je njihova sposobnost apsorpcije vlage, što može uzrokovati nevidljiva oštećenja u strukturi zrakoplova i zahtijeva dodatne preglede [6].

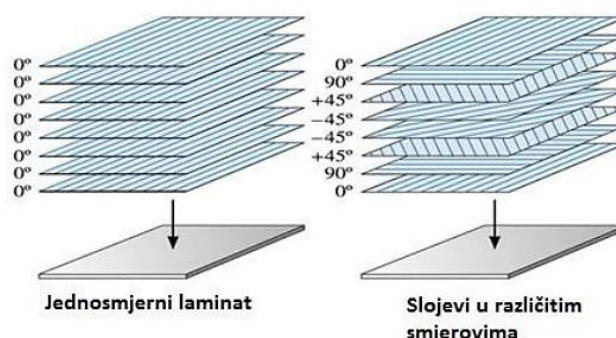
### 3. Složeni i hibridni kompoziti u konstrukciji zrakoplova

Složeni kompoziti su materijali čije karakteristike ovise ne samo o svojstvima konstrukcijskih materijala, već i o geometriji rasporeda elemenata unutar konstrukcije. U konstrukcijske svrhe, složeni kompoziti koriste se u dva osnovna oblika:

- slojeviti ili laminatne strukture i
- sendvič konstrukcije.

#### 3.1 Slojeviti kompoziti (laminati)

Laminirani kompoziti ili slojeviti materijali sačinjeni su od više čvrsto povezanih dvodimenzionalnih slojeva (ploča ili panela) s dominantnim smjerom visoke čvrstoće (slika 2). Ti slojevi pružaju najbolja svojstva u smjeru primijenjenog opterećenja, što omogućava smanjenje potrebne količine materijala i, sukladno tome, smanjenje ukupne mase, što predstavlja značajnu prednost u zrakoplovstvu.



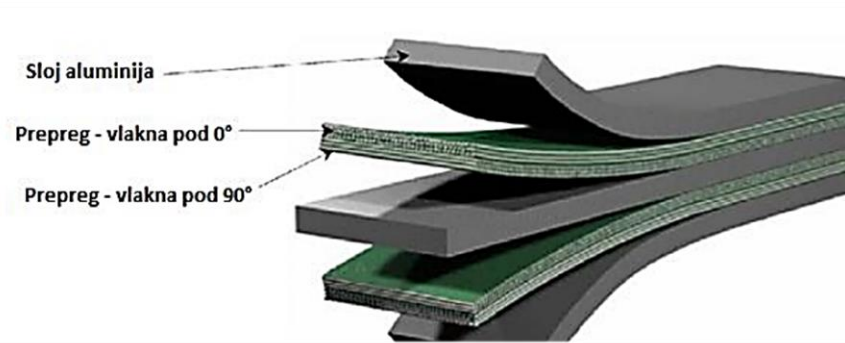
Slika 2. Prikaz slojevitog kompozita

Izvor: [19]

Slojeviti kompoziti dolaze u raznim varijantama, uključujući obloge i bi-metalne strukture koje se stvaraju spajanjem dvaju metala kroz postupke hladnog valjanja, koaksijalne kablove dobivene ekstruzijom, te različite kompozite koji se formiraju prešanjem pri visokim tlakovima i temperaturama.

Također, ploče se mogu spojiti i lemljenjem, gdje metalne ploče blago razmaknute i zagrijane iznad tališta lemljene legure omogućavaju da se legura istopi i prodre u proreze između ploča.

U zrakoplovstvu, primjer slojevitog kompozita je GLARE (engl. *Glass Reinforced Aluminium*), koji pripada kategoriji vlaknasto-metalnih laminata (engl. *Fiber Metal Laminate* - FML). GLARE se sastoji od izuzetno tankih slojeva metala, obično aluminija, koji su obavijeni slojevima staklenih vlakana i čvrsto povezani epoksidnom smolom. Struktura slojevitosti GLARE kompozita prikazana je na slici 3 [7].



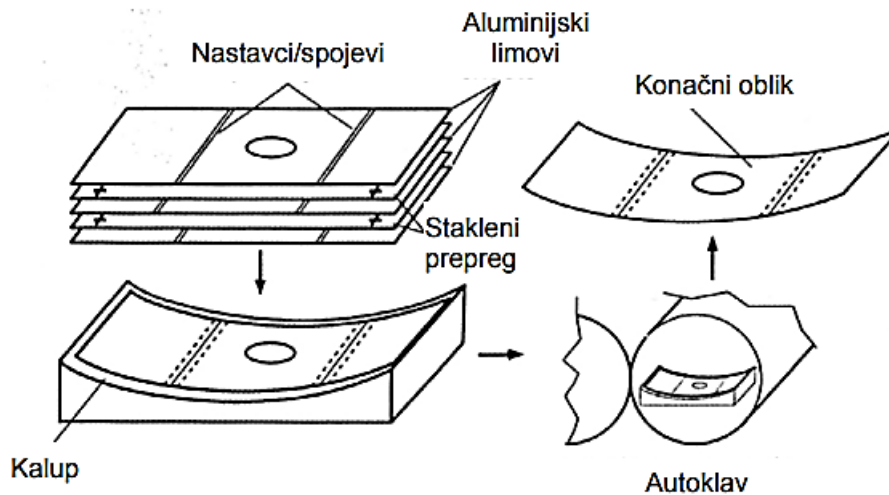
Slika 3. Kompozitni materijal GLARE

Izvor: [20]

Iako je GLARE kompozitni materijal, njegova svojstva materijala i izrada vrlo su slični masovnim aluminijskim limovima, ali njegove glavne prednosti su:

- bolja tolerancija na oštećenje, posebno pri udaru i zamoru metala,
- veća otpornost na probijanje,
- bolja otpornost na koroziju,
- bolja otpornost na požar i
- manja specifična težina.

Proizvodnja GLARE-a uključuje postavljanje staklenih tkanina natopljenih polimernom smolom, poznatim kao prepreg, između aluminijskih limova, stvarajući višeslojnu strukturu s nizom ojačanja. Ti slojevi se spajaju i oblikuju u kalupima. Materijal u kalupu podvrgava se visokim temperaturama i tlakovima kako bi se omekšala polimerna smola i čvrsto povezali metalni slojevi, što je i prikazano u slici 4. Budući da mehanička svojstva ove vrste kompozita ovise o smjeru orijentacije vlakana u pojedinačnim slojevima, laminati moraju biti usmjereni tijekom ugradnje tako da imaju najveći otpor mehaničke čvrstoće u smjeru najvećih vanjskih naprezanja [8].



Slika 4. Postupak proizvodnje "GLARE" laminata

Izvor: [21]

GLARE laminati primjenjuju se u Airbusovom zrakoplovu A380, gdje se koriste za izradu oplata trupa, određenih dijelova krila, bočnih panela i stražnjeg dijela trupa, što je ilustrirano na slici 5.



Slika 5. Airbus A380

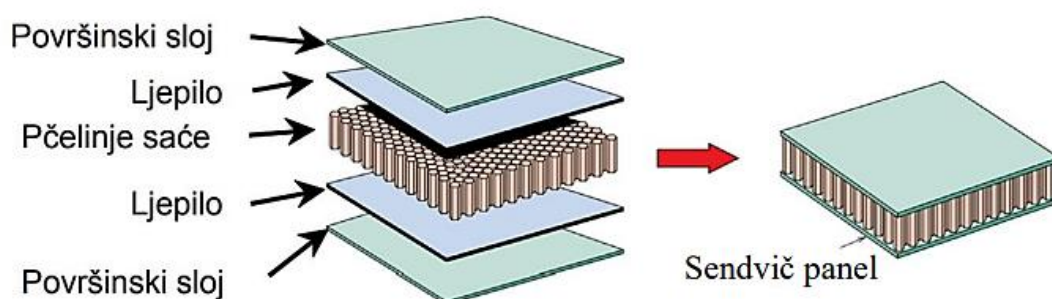
Izvor: [22]

U unutarnjoj strukturi laminata nalazi se četiri ili više aluminijskih limova debljine 0,38 mm, međusobno povezanih s vezivnim slojem staklenih vlakana natopljenih smolom. Korištenjem takvih laminata postiže se značajno smanjenje ukupne težine zrakoplova, čak do 30% u usporedbi s konvencionalnim aluminijskim legurama.

## 3.2 Sendvič konstrukcije

Strukturalna sendvič konstrukcija sastoji se od dvije vanjske krute i čvrste ploče ili plohe (engl. *face-sheets*) međusobno povezane i odvojene „srčikom“ (eng. *core*), koja čini jezgru konstrukcije. Vanjske ploče mogu biti od bilo kojeg materijala, tipično aluminijska, fiberglasa s epoxy smolom ili grafit epoxy. Primjer ove konstrukcije poznat je kao valoviti karton, no u zrakoplovstvu se često koriste sendvič konstrukcije oblikovane poput pčelinjeg saća.

Kao što je prikazano na slici 6., ova konstrukcija uključuje vanjske slojeve i unutarnje pčelinje saće, obično izrađene od tankih aluminijskih limova, traka ili folija, oblikovane u šesterokutne ćelije koje su usmjerene okomito na površinske slojeve. Povezanost pčelinjeg saća i vanjskih slojeva ostvaruje se primjenom određenih ljepila.



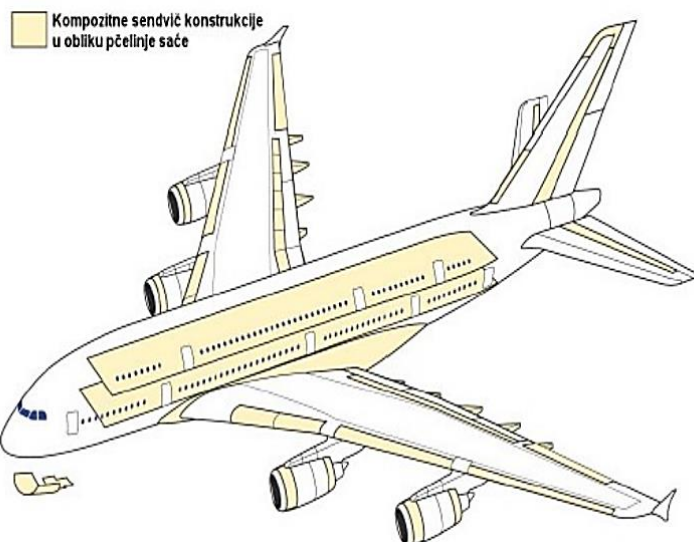
Slika 6. Prikaz strukturalnog kompozitnog materijala s jezgrom u obliku pčelinjeg saća

Izvor: [23]

Najčešće korišteni materijali za jezgre su:

- Polimerne pjene od polivinil-klorida (PVC), polistirena (PS), poliuretana (PUR), polieterimida (PEI), akrilne pjene.
- Aluminijski ili polimerni kompoziti (aramidna vlakna u kombinaciji s akrilnitril/butadien/stirenskom (ABS), polikarbonantom (PC), polipropilenskom (PP) i polietilenskom (PE) matricom) u izradi saća.
- Drvo (balza, cedar).

Sendvič konstrukcije u izradi zrakoplova se uvelike upotrebljavaju za dijelove krila, trupa i repa zrakoplova, odnosno za one elemente koji zahtijevaju visoku čvrstoću, krutost i malu masu pri velikim opterećenjima. Airbus zrakoplova A380 napravljen je od 100 takvih aluminijskih sendvič panela kao što je prikazano na slici 7.



Slika 7. Dijelovi sendvič konstrukcije u obliku pčelinje saće na zrakoplovu Airbus A380

Izvor: [24]

Uveliko upotrjebljavan u zrakoplovnoj industriji i mnogim drugim industrijama, sendvič konstrukcija pruža sljedeće ključne prednosti u odnosu na konvencionalne materijale [9]:

- visoka krutost,
- vrlo mala težina,
- uštede troškova proizvodnje i
- izdržljivost.

### 3.3 Hibridni kompoziti

Hibridni kompoziti nastaju kombiniranjem nekoliko vrsta vlakana i njihovim ojačavanjem u jedinstvenu matricu. Glavna prednost takvih kompozita je da imaju daleko bolju čvrstoću i kvalitetu od kompozita ojačanih samo jednom vrstom vlakana. Postoji nekoliko kombinacija vlakana i matrice, ali ugljik i staklo su najčešće korištena vlakna u polimernoj matrici. Karbonska vlakna imaju vrlo veliku čvrstoću, krutost i gustoću, ali su i skupa, što ograničava njihovu primjenjivost. Za razliku od njih, staklena vlakna imaju lošija mehanička svojstva, ali su znatno ekonomičnija opcija [8].

Karakteristike ovih kompozita mogu biti vrlo varijabilne zbog široke raznolikosti načina slaganja vlakana u matricu. Na primjer, vlakna mogu biti usmjerena u jednom smjeru ili u nekoliko usmjerenja, a laminati mogu biti slojeviti od brojnih slojeva, od kojih svaki ima različitu vrstu ojačanja.

Značajna uporaba hibridnih kompozita može se naći u Boeing-ovim zrakoplovima, gdje se koriste za proizvodnju strukturnih dijelova oplata. Tablica 1. prikazuje različite hibridne kompozitne i njihova svojstva.

Tablica 1. Svojstva hibridnih kompozita

<b>Kompozit s ugljičnim i aramidnim 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 s aramidnim i 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: [25]

Hibridni materijali se sve više koriste u modrenom dobu zbog potrebe za smanjenjem troškova izrade i eksploatacije materijala. Jedna od novosti u vezi hibridnih kompozita jest upotreba biokompozita umjesto staklenih vlakana u polimernim matricama. Hibridni biokompoziti osiguravaju strukturnu i funkcionalnu stabilnost tijekom skladištenja i uporabe, no istovremeno su podložni ekološkoj degradaciji prilikom odlaganja.

Kombinacija sintetičkih i prirodnih vlakana (biovlakna) ili različitih vrsta prirodnih vlakana unutar matrice omogućuje formiranje hibridnih biokompozita. Biovlakna se mogu dobivati iz biljnih ili životinjskih izvora (poput drvnih vlakana, trave, slame, lišća, sjemenki, voća, itd.). Ova vrsta materijala ima nekoliko prednosti, uključujući široku dostupnost, nisku cijenu, nisku gustoću, veliku čvrstoću i krutost, jaku električnu vodljivost, učinkovitu zvučnu izolaciju i sigurnost u rukovanju i proizvodnji.

Hibridni biokompoziti imaju svoje nedostatke, kao što su osjetljivost na degradaciju, varijacije u veličini vlakana i mehaničkim svojstvima ovisno o izvoru vlakana, izazovno raspršivanje vlakana unutar matrice, sklonost upijanju vlage te raspadanje pri temperaturama između 90°C i 200°C



## 4. Materijali vlakana i matrica u zrakoplovnoj konstrukciji

### 4.1 Vrste vlakana

Kompozitni materijali se sastoje od dvaju osnovnih elemenata: vlakna i matrice koji čine međusobno povezane slojeve. Vlakna se koriste ojačavanje i poboljšanje svojstava materijala u kombinaciji sa matricom kako bi se stvorili kompozitni materijali s unaprijed definiranim svojstvima.

Za izradu zrakoplovnih komponenti obično se koriste slijedeće vrste ojačala:

- Karbonska (ugljična) vlakna (engl. *Carbon Fiber-Reinforced Plastic - CFRP*),
- Staklena vlakna (engl. *Glass Fiber Reinforced Plastic - GFRP*),
- Aramidna vlakna (engl. *Aramid Fiber Reinforced Plastic - AFRP*) i
- Vlakna od kvarca (engl. *Quartz Fiber Reinforced Plastic - QFRP*).

Ugljična (karbonska) vlakna, s najboljim svojstvima među vlaknastim ojačalima, čine 57% od najprimjenjivanih vlakana u zrakoplovnoj konstrukciji. Ova vlakna su posebno rasprostranjena u mehanički opterećenim dijelovima kao što je struktura aviona. Ugljična vlakna se ističu visokom specifičnom krutošću i specifičnom čvrstoćom te zadržavaju svoje karakteristike i pri povišenim temperaturama. Također, otporna su na vlagu, otapala, kiseline i lužine, a dostupni su i ekonomični postupci za njihovu proizvodnju [10].

Staklena vlakna se često koriste u slučajevima gdje su mehanički zahtjevnosti konstrukcije manje, zahvaljujući njihovoj vrlo niskoj cijeni. Ovaj tip vlakana je bijele ili prozirne boje i karakterizira ga visoka čvrstoća, ali i smanjena krutost. Uporaba ovih kompozita uvjetovana je temperaturom do 200°C, iznad koje dolazi do tečenja stakla i gubljenja svojstava, ali za zrakoplovne konstrukcije rabe se visoko-čista staklena vlakna koja u kombinaciji s visoko temperaturnom polimerom smolom, kao što su polimidne smole, mogu podnijeti temperature i do 300°C [11]. Staklena vlakna pokazuju otpornost na utjecaje okoliša i koroziju, a zbog svoje sposobnosti dobrog prijenosa radio valova, primjenjuju se za izradu napadnih rubova krila, staklenih okvira koji štite donji dio trupa zrakoplova tijekom opterećenja (engl. *belly fairings*), te za određene dijelove unutrašnjosti zrakoplova.

Aramidna vlakna, u potpunosti sintetski stvorena, uključuju najpoznatija Kevlarska vlakna, dok se polimidi sve više koriste zbog svoje sposobnosti rada na visokim temperaturama, čak i iznad 300 °C. Aramidna vlakna pokazuju niži modul smicanja u uzdužnom smjeru i ograničena svojstva u poprečnom smjeru zbog prisutnih slabih vodikovih veza. Ipak, ističu se visokom uzdužnom vlačnom čvrstoćom, kemijskom otpornošću i niskom gustoćom. U zrakoplovstvu su atraktivna za postizanje čvrstoće uz malu masu [12].

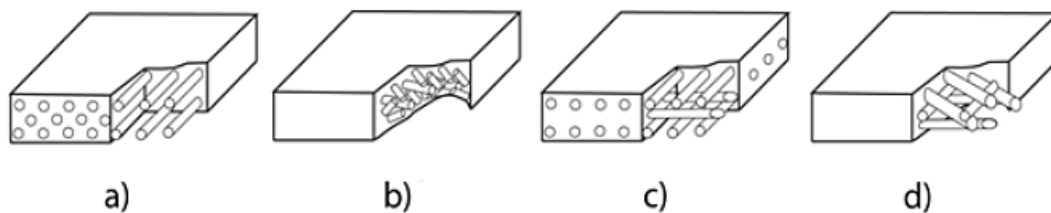
Vlakna od kvarca su visoko čvrsta keramička vlakna proizvedena iz rastopljene kvarcne staklene mase, istaknuta svojom izvanrednom otpornošću na visoke temperature (1.100 °C), kemikalije i koroziju. Njihova niska toplinska ekspanzija i visoka mehanička čvrstoća čine ih iznimno korisnim u zrakoplovnoj industriji. Vlakna od kvarca se primjenjuju kod izrade nosnih kupola zrakoplova zbog sposobnosti prijenosa radiovalova. Na slici 8 u nastavku su prikazani dijelovi zrakoplova A320 napravljeni od pojedinih materijala kao što su ugljik, staklo, aramid i kvarc.



Slika 8. Temeljna svojstva ugljičnih, staklenih, aramidnih vlakana i vlakana od kvarca na zrakoplovu A320

Izvor: [26]

Vlakna unutar matrice mogu biti raspoređena na različite načine, kao što je prikazano na slici 9: kontinuirano u jednom smjeru (a), slučajno usmjerena i diskontinuirana (b), ortogonalno raspoređena (c) i višesmjerno usmjerena (d). Kvaliteta kompozita određena je rasporedom usmjerenosti vlakana. Tako je na primjer, kada je čvrstoća kontinuiranih jednosmjernih vlakana relativno visoka u smjeru pružanja vlakana, ali znatno smanjena okomito na njih [11].



Slika 9. Raspoređi vlaknastih ojačala

Izvor: [13]

## 4.2 Vrste matrica

Svojstva matrice igraju ključnu ulogu u definiranju karakteristika kompozita i postavljaju granice njihove primjene. Kompoziti se zahtijevaju da zadrže visoku stabilnost pri temperaturama do 150 °C, te iznimno, i do 200 °C. Kada su izloženi kemijskim utjecajima ili okolišnim čimbenicima, matrica je prva koja pokazuje smanjenje mehaničkih svojstava, značajno utječući na ponašanje kompozita.

U zrakoplovnoj konstrukciji, matrica mora biti otporna na pogonska goriva, hidrauličke fluide i različite kemikalije koje se koriste tijekom održavanja, kao što su i sredstva za uklanjanje boje. Osiguranje kemijske i termalne stabilnosti matrice ključno je za osiguranje dugotrajne i pouzdane učinkovitosti kompozitnih materijala u zrakoplovstvu [12].

Prema vrsti materijala matrica može biti:

- **polimerna** (polimerni kompozit-PMC),
- **metalna** (metalni kompozit-MMC) i
- **keramička** (keramički kompozit-CMC).

Kompoziti s polimernom matricom sastavljeni su od polimerne smole kao matrice s vlaknima kao komponentom za ojačavanje. Polimerna matrica je ključni element u kompozitnim materijalima koji se koriste u zrakoplovstvu. Ona povezuje vlakna i doprinosi čvrstoći, laganoj masi i izdržljivosti zrakoplovnih komponenata. Polimerna matrica se primjenjuje u izradi strukturnih dijelova kao što su trupovi, krila i repovi zrakoplova, te unutarnjih komponenata kao što su sjedala i obloge. Njezina prilagodljivost omogućava složene dizajne, dok otpornost na koroziju doprinosi dugotrajnosti zrakoplova [11].

Metalna matrica može se sastojati od super-legura, legura aluminijske, magnezij, titana i bakra. Ona omogućuje visoku čvrstoću i krutost uz vrlo malu gustoću, visoku toplinsku i električnu vodljivost, otpornost na trošenje, te dobra svojstva na visokim temperaturama. Metalna matrica se često koristi za strukturne dijelove poput okvira, spojnica i komponenti motora, pružajući iznimnu čvrstoću i sposobnost podnošenja visokih naprezanja. Njezina visoka toplinska provodljivost čini je idealnom za dijelove koji moraju izdržati visoke temperature, kao što su ispušni sustavi i dijelovi motora. Neki od nedostataka metalnih kompozita su vrlo visoka cijena, kompliciranost proizvodnje i loša recikličnost.

Keramički kompoziti su materijali koji se koriste za mehanički zahtjevnije dijelove pod ekstremno visokim radnim temperaturama, primarno u svemirskim letjelicama. Iako njihov razvoj još uvijek ima niz tehničkih izazova, šira primjena se predviđa za budućnost. Keramička matrica se ističe stabilnošću na visokim temperaturama, otpornošću na toplinski udar, iznimnom otpornošću na koroziju, visokom tvrdoćom i malom masom, ali je osjetljiva na lom, što je čini atraktivnom za primjenu u toplinskim strojevima, zrakoplovima i svemirskim uređajima podložnim ekstremnim temperaturama [13].

## 5. Primjena kompozitnih materijala na modernim zrakoplovima

Rast zračnog prometa postavlja zahtjeve za naprednijim zrakoplovima koji moraju biti veći, sigurniji, ekološki prihvatljiviji i sposobni za duge letove. U susret tim izazovima, kompozitni materijali postaju ključni u proizvodnji zrakoplova. Oni su lakši od tradicionalnih materijala, omogućujući konstrukciju većih i ekonomičnijih zrakoplova, poput Airbus A380 i Boeing B787. Ovi materijali smanjuju potrošnju goriva i troškove te povećavaju nosivost.

Napredak u strukturnim svojstvima kompozita omogućava ispunjenje kompleksnih zahtjeva u izradi elemenata zrakoplova poput oplata, elisa, upravljačkih površina i trupa. Redovito održavanje kompozitnih struktura ključno je za sigurnost i učinkovitost, što uključuje otkrivanje šupljina, pukotina i oštećenja pomoću rendgenskih pregleda, ručnih sonda i zagrijavanja.

Primjena kompozita u zrakoplovstvu znatno smanjuje masu letjelica, potrošnju goriva i troškove, otvarajući vrata za napredniji dizajn i ekološku održivost u budućim generacijama zrakoplova.

### 5.1 Airbus A380

Airbus A380, prikazan na slici 10, najveći je dvopalubni putnički zrakoplov na svijetu, proizvod europske tvrtke Airbus, predstavlja značajno korištenje kompozitnih materijala u zrakoplovnoj industriji. Ideja o operativno jeftinijem zrakoplovu s dvije palube prezentirana je 1994. kao A3XX, kasnije nazvan A380. Prvi let zrakoplova bio je 27. travnja 2005., s ukupnim troškovima od 25 milijardi dolara. Ovaj superjumbo ima kapacitet od 525 – 853 putnika i masu od 590 tona. Kompozitni materijali, uključujući polimerne kompozite i laminirane aluminijske elemente ojačane staklenim vlaknima, čine više od 20% ukupne mase zrakoplova.



Slika 10. Airbus A380

IZVOR: [14]

Prilikom analize Airbusa A380, valja istaknuti njegove impresivne dimenzije: duljina od 72,75 m, širina trupa od 24,08 m, te impresivan razmah krila od 79,8 m. Ovaj zrakoplov se oslanja na snagu četiriju motora Rolls-Royce Trent snage 374 kN, omogućujući mu postizanje impresivne i ujedano najveće brzine od 1.020 km/h i učinkovite brzine krstarenja od 900 km/h. Njegova iznimna izdržljivost se očituje u maksimalnom doletu od 14.800 km i maksimalnoj visini leta od 13.100 m. Podaci o masama ovog zrakoplova dani su u tablici 2. [14].

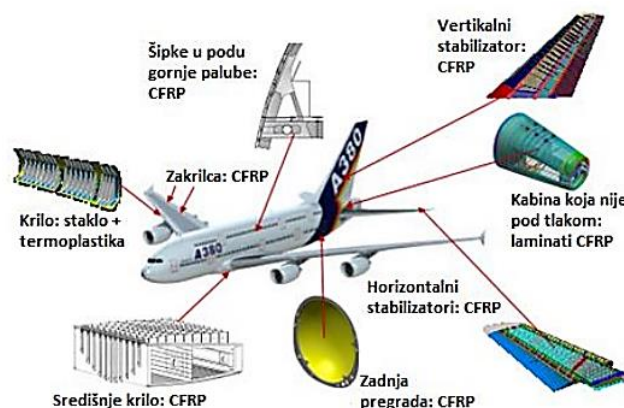
Tablica 2. Operativne mase zrakoplova A380

Najveća masa u polijetanju	560.000 kg
Najveća masa u polijetanju	386.000 kg
Najveća masa bez goriva	361.000 kg
Najveći kapacitet goriva	320.000 l
Masa praznog zrakoplova	277.000 kg

Izvor: [14]

Prvi put u povijesti zrakoplovstva, središnji dijelovi krila zrakoplova A380 izrađeni su od kompozitnog materijala CFRP (engl. *Carbon Fiber Reinforced Plastic* – Plastika ojačana ugljičnim vlaknima). Korištenjem kompozitnih materijala, težina krila zrakoplova smanjena je za 1,5 tona. Središnje krilo ima ukupnu masu od 8,8 tona, pri čemu 5,3 tone čini kompozitni materijal. Izazovno je bilo povezivanje krila s trupom zrakoplova, s kompozitnim komponentama koje su mogle doseći debljinu od 45 mm. Ovaj izazov riješen je primjenom kompozitnih šipki istog materijala, širine 23 mm i duljine 16 m.

Na zrakoplovu A340-600 prvi put su primijenjene CFRP šipke, s nosivostima do 450 tona po šipki. Također, iz istog materijala izrađeni su vertikalni i horizontalni stabilizatori, kormilo te šipke u podu gornje palube. Dodatno, prednja ivica krila proizvedena je od termoplastike, čime je pojednostavljena proizvodnja i ugradnja, te smanjeni troškovi i ukupna masa komponente. Slika 11 prikazuje različite dijelove izrađene od CFRP kompozitnog materijala [15].

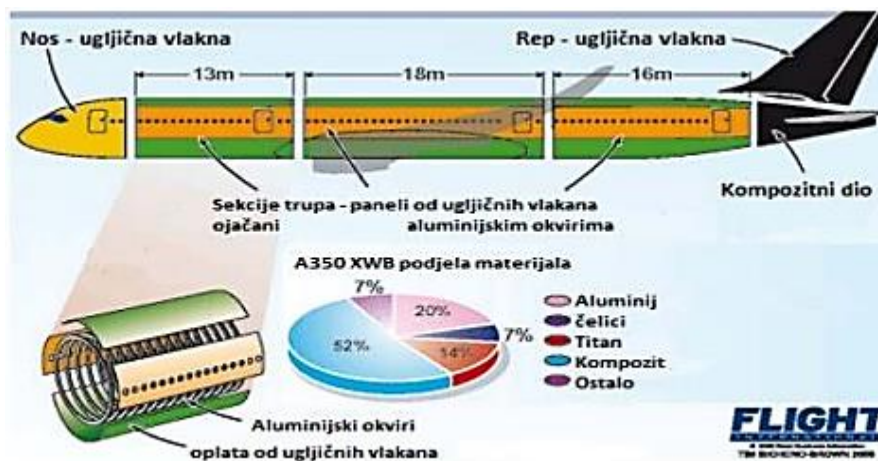


Slika 11. CFRP kompoziti na dijelovima A380

Izvor: [15]

Nadalje, Airbus je također razvio putnički zrakoplov A350 XWB, gdje čak 53% konstrukcije čine kompozitni materijali. Ovaj zrakoplov ima 100% kompozitni trup, što osigurava električnu otpornost. Struktura tog zrakoplova prikazana je na slici 12. Osim impresivnih performansi, primjena kompozitnih materijala omogućila je veću nosivost, efikasnost i ekološku prihvatljivost ovih zrakoplova. Izgradnja A350 XWB koristi raznolik niz materijala: 53% kompozita, 19% aluminijske trake (AL/AL-Li), 14% titana i 6% čelika [18].

Kompozitne kožne ploče pažljivo su postavljene preko kompozitnih okvira, zadržavajući jedinstveni ovalni presjek trupa. Važno je napomenuti da su aluminijske trake unutar okvira prilagođene kako bi učinkovito raspršivale udare munje. Primjenom kompozita na A350XWB, Airbus je povećao servisne intervale za zrakoplov sa šest godina do dvanaest godina, što značajno smanjuje troškove održavanja za kupaca. Visoki postotak kompozita također smanjuje potrebu za pregledima povezani s umorom potrebni na tradicionalnijim aluminijske mlaznice i smanjuje potrebu za provjere održavanja povezane s korozijom.



Slika 12. Konstrukcijski materijal zrakoplova Airbus A350 XWB

Izvor: [18]

## 5.2 Boeing B787 Dreamliner

Boeing B787 Dreamliner, prikazan na slici 13, je američki širokotrupni zrakoplov s kapacitetom od 210 – 330 putnika. Dosad najekonomičniji zrakoplov u svojoj klasi smanjuje potrošnju goriva za do 20% u odnosu na ostale zrakoplove. Njegova prednost leži u korištenim materijalima i postupcima izrade, a ne u veličini (unatoč tome što je Airbus A380 i dalje najveći zrakoplov na svijetu). Zbog nekoliko tehničkih problema probni let je bio odgađan više puta, te je nakon opsežnih testiranja na zemlji prvi let zrakoplova bio 15. prosinca 2011., a ukupni troškovi su iznosili 32 milijardi dolara, te je do sad izrađeno 1.068 primjeraka ovoga zrakoplova [16].



Slika 13. Boeing B787 Dreamliner

Izvor: [16]

Dreamliner je širokotrupni zrakoplov s dva Rolls-Royce Trent 1000 ili GENx motora. Razmah krila iznosi 60,1 m, duljina trupa 56,7 m i širina trupa 5,97 m. Najveći dolet mu je 14.500km, a najveća krstareći brzina 903 km/h, te ima projektirani životni vijek od 44.000 sati. Operativne mase zrakoplova prikazane su u tablici 3.

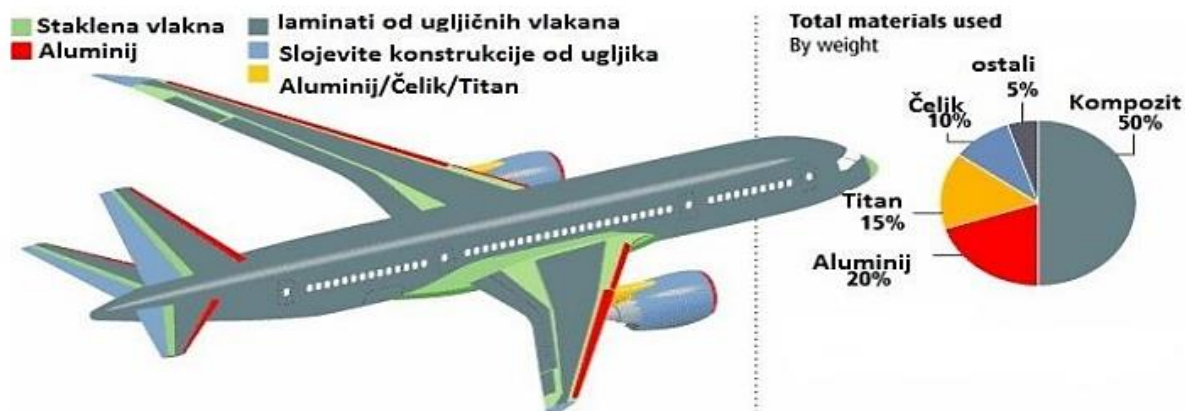
Tablica 3. Operativne mase zrakoplova Boeinga B787 Dreamliner

Najveća masa polijetanju	228.000 kg
Najveća masa u slijetanju	172.000 kg
Najveća masa bez goriva	161.000 kg
Najveći kapacitet goriva	126.210 l
Masa praznog zrakoplova	118.000 kg

Izvor: [16]

Ovaj dugolinijski, širokotrupni, dvomotorni mlazni zrakoplov napravljen je od 50% kompozitnih materijala, 20% aluminij, 15% titanij, 10% čelik i 5% ostalo, što je vidljivo na slici 14. Oko 80% trupa izrađeno je iz jednog komada smole ojačane ugljičnim vlaknima, te je takav kompozit značajno je smanjio težinu zrakoplova te omogućio uštedu goriva i povećanje doleta.

Aluminij je korišten u vodećim rubovima krila i repnih aviona, titan je pretežno prisutan unutar elemenata motora i pričvrstih elemenata, dok su različite pojedinačne komponente sastavljene od čelika. Na slici 14 može se vidjeti kako su sendvič konstrukcije s ugljičnim vlaknima korištene za izradu *wingleta*, kormila, trimera i nosača motora zrakoplova, dok su spojevi krila s trupom izrađeni od fiberglasa.



Slika 14. Materijali korišteni na zrakoplovu Boeing 787 Dreamliner

Izvor: [27]

### 5.3 Bell-Boeing V-22 Osprey

Bell-Boeing V-22 Osprey, prikazan na slici 15, je višenamjenski američki vojni zrakoplov s nagibnim rotorom koji je hibrid između helikoptera i turboelisnog aviona, te ima mogućnost vertikalnog polijetanja i slijetanja (engl. *Vertical Take-off and Landing* - VTOL) i kratkog polijetanja i slijetanja (engl. *Short Take-off and Landing* - STOL). Prvi let imao je 19. ožujka 1989., s ukupnim troškovima od 27 milijardi dolara. Ovaj zrakoplov ima kapacitet od 24- 32 putnika i masu od 14,4 tone. Pogonjen je dvoma turboprop Rolls-Royce AE1107C motorima koji su povezani pogonskim osovinama tako da jedan može napajati oba propelera ako dođe do kvara jednog od motora. Najveća brzina mu je 509 km/h, a najveći dolet je 1.628 km.





Slika 15. Bell-Boeing V-22 Osprey

Izvor: [28]

Čak 44% letjelice 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 [21]. Operativne mase zrakoplova prikazane su u tablici 4.

Tablica 4. Operativne mase Bell-Boeing V-22 Osprey

Najveća masa polijetanju	27.443kg
Najveća masa u slijetanju	21.500kg
Najveća masa bez goriva	14.798kg
Najveći kapacitet goriva	6.125kg
Masa praznog zrakoplova	15.000kg

Izvor: [28]

## 6. Zahtjevi plovidbenosti zrakoplova izrađenih od kompozitnih materijala

Zračni promet je potrebno u najvećoj mjeri zaštititi od opasnosti do kojih može doći za vrijeme leta zrakoplova ili u periodu kada je zrakoplov prizemljen, tj. u stanju održavanja. Nacionalne i međunarodne vlasti uspostavljaju specifične certifikate ovisno o vrsti operacija, kako bi osigurale usklađenost s propisima i sigurnost svih uključenih subjekata.

U zrakoplovstvu propisi se odnose ne samo na proizvođače, nego i na organizacije za održavanje zrakoplova, osoblje, operatere, putnike, pružatelje zračnih i zemaljskih usluga, zračne linije, kontrolu zračne plovidbe i licencirano osoblja. Nositelji ovih certifikata moraju strogo slijediti pravila; u suprotnom, vlasti imaju ovlasti da ponište ili suspendiraju dodijeljene certifikate.

Primjeri ključnih certifikata u zrakoplovstvu uključuju:

- EASA Aneks 21
- Aneks M i Aneks 145
- Cs-25

EASA Aneks 21 predstavlja certifikacijski okvir koji se odnosi na projektiranje i proizvodnju zrakoplova. Ovaj certifikat pokriva procese certificiranja letjelica, što znači da svi dijelovi, sustavi i konstrukcije moraju biti ispitani, evaluirani i usklađeni s propisima kako bi se osigurala sigurnost i pouzdanost zrakoplova.

Aneks M i Aneks 145 su certifikati koji se odnose na održavanje zrakoplova i organizacije odgovorne za to održavanje. Aneks M se bavi organizacijom i upravljanjem tehničkim održavanjem letjelica te osigurava da zrakoplovi održavaju svoje zrakoplovne sposobnosti i sigurnosne standarde. Aneks 145 se odnosi na organizacije održavanja koje obavljaju tehničko održavanje, popravke i inspekcije letjelica.

Cs-25 predstavlja certifikaciju koja se usredotočuje na projektiranje velikih zrakoplova. Ovaj certifikat obuhvaća sve aspekte projektiranja, konstrukcije i izgradnje zrakoplova i postavlja visoke standarde za dizajn samih zrakoplova kako bi se osigurala njihova sigurnost, pouzdanost i izdržljivost, a uključuje strukturalnu izdržljivost, performanse u letu, sustave zaštite od požara i mnoge druge tehničke aspekte.

Za plovidbenost zrakoplova odgovorni su svi - proizvođači zrakoplova, operateri i organizacije za održavanja samih zrakoplova, a ne samo vlasti koje provode i izdaju sigurnosne propise. Za različite dijelove svijeta postoje drugačiji certifikati koje izdaju određene agencije za sigurnost u zračnom prometu.

## 6.1 Propisi za plovidbenost Europske Unije

Europska agencija za sigurnost zračnog prometa (EASA) ima odgovornost postavljanja i nadziranja tehničkih standarda za zrakoplovnu plovidbenost u Europi, uključujući i zrakoplove izrađene od kompozitnih materijala. Njen osnovni cilj je osigurati visoke standarde sigurnosti, zaštite okoliša te učinkovitosti zračnog prometa unutar europskog kontinenta.

Zahtjevi plovidbenosti za zrakoplove izrađene od kompozitnih materijala u Europi obuhvaćaju niz tehničkih specifikacija i standarda koji osiguravaju siguran dizajn, izgradnju, operaciju i održavanje takvih zrakoplova. U svom AMC 20-29 dokumentu, Europska agencija za sigurnost zračnog prometa (EASA) je pružila obuhvatne smjernice za ispitivanje statičke izdržljivosti i otpornosti na oštećenja pri korištenju kompozitnih materijala u izradi konstrukcija zrakoplova [17].

Zahtjevi za plovidbenost propisani od Europske agencije za sigurnost zračnog prometa obuhvaćaju različite aspekte kao što su:

- Razvoj materijala i kontrola proizvodnje
- Otpornost strukture – statička
- Otpornost strukture – zamor i tolerancija na udarce
- Otpornost strukture – vihorenje (engl. *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

Važno je osigurati da primjena kompozitnih materijala ne ugrožava razinu sigurnosti zrakoplova. Stoga je ključno provesti sveobuhvatna ispitivanja vezana za konstrukciju zrakoplova. Važno je istaknuti da kvaliteta i standardizacija proizvodnje kompozitnih materijala igraju ključnu ulogu. Različite metode obrade i proizvodnje mogu utjecati na mehanička svojstva materijala. Stoga je nužno strogo kontrolirati proizvodni proces materijala te pravilno rukovati materijalom prije dostave u tvornicu za daljnju proizvodnju.

Prilikom ispitivanja Europska agencija za sigurnost zrakoplovstva uzima u obzir raznovrsne čimbenike, uključujući razine naprezanja, opterećenja, materijale, proizvodne metode i utjecaj na okoliš. Materijal za konstrukciju treba biti precizno specificiran na svim razinama pojedinih elemenata od kojeg se sastoji kompozit, uključujući smolu, vlakna, čestice i slično.

Testiranje kompozitnih materijala uključuje dinamička ispitivanja na 10.000 ciklusa koja otkrivaju ponašanje materijala pod različitim naprežanjima te akumulaciju strukturalnih oštećenja koja pokazuju ponašanje kompozita na razini matrice i vlakana.

Tijekom ispitivanja strukture zrakoplova, simuliraju se kritična opterećenja koja provjeravaju izdržljivost strukture u zahtjevnim uvjetima eksploatacije. Također se provodi ispitivanje maksimalnog opterećenja kako bi se pokazala izdržljivost strukture pri nosivosti maksimalnog tereta bez dodavanja sigurnosnih faktora. Prilikom ispitivanja opterećenja, važno je uzeti u obzir faktore poput koncentracija naprezanja, uvjeta okoline (vlaga, temperatura, itd.), varijacija materijala, proizvodnih procesa i karakteristika spojeva. Ispitivanje statičke izdržljivosti provodi se u specifičnim uvjetima kako bi se analizirale različite situacije tijekom eksploatacije.

U analizi zrakoplovne industrije istražuju se različiti aspekti, uključujući testiranje na vihorenje (engl. *flutter*) i istraživanje pojedinih elemenata kao što su zglobovi, spojevi više elemenata, detalji elemenata, samostalni elementi, struktura krila te segmenti trupa, horizontalni i vertikalni stabilizatori. Za postizanje optimalne čvrstoće, krutosti, trajnosti i pouzdanosti materijala u proizvodnji, koriste se različiti mehanički, kemijski i fizički testovi materijala. Ispitivanja u različitim uvjetima okoline, uključujući ekstremne temperature i uvjete vlage, također su bitna [17].

Zbog kontinuiranog napretka kompozitnih materijala, nadzorna tijela pažljivo prate nove dizajne i strukturne koncepte zrakoplova koji bi mogli zahtijevati specifična ispitivanja. Agencija kontinuirano pristupa sigurnosti s ciljem predviđanja potencijalnih problema. U kontekstu kompozitnih materijala, važno je pratiti razvoj metodologija certificiranja i ispitivanja konstrukcijskih elemenata kako bi se osigurala sigurnost i pouzdanost zrakoplova.

## 6.2 Propisi za plovibenost Sjedinjenih Američkih Država

Savezna uprava za civilno zrakoplovstvo (FAA) je agencija američkog Ministarstva prometa koja je nadležna za reguliranje i nadziranje svih aspekata civilnog zračnog prometa u Sjedinjenim Američkim Državama. Testiranje i proces certificiranja komercijalnih zrakoplova moraju biti vrlo strogi zbog specifičnih karakteristika kompozitnih materijala. Ključno je osigurati stabilan izvor sirovina kako bi se osiguralo sigurno i pouzdano korištenje kompozitnih materijala u proizvodnji zrakoplova.

Da bi se osigurao integritet i pouzdanost zrakoplovnih kompozitnih struktura, FAA zahtijeva ispunjavanje niza regulativa koje odobravaju korištenje 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

- Testiranje izdržljivosti i prikladnost
  - Usklađivanje sa specifikacijama
  - Uvjeti utjecaja okoline
- FAR 25.605, Metode proizvodnje
- Metode proizvodnje moraju proizvesti dosljednu čvrstoću strukture
  - Nove metode moraju proći ispitivanja
- FAR 25.609, Zaštita strukture
- Struktura mora biti zaštićena od propadanja ili gubitka čvrstoće
  - Osiguranje integriteta tijekom operacija
- FAR AC 20-107A, Kompozitna struktura zrakoplova
- Smjernice za certificiranje naprednih kompozitnih struktura
- FAR AC 21-26, Kontrola kvalitete proizvodnje kompozitne strukture
- Standardi za kontrolu kvalitete tijekom proizvodnje kompozitnih struktura

FAA je uspostavila precizne propise koji reguliraju proces certificiranja plovidbenosti zrakoplovnih konstrukcija izrađenih od kompozitnih materijala. Istovremeno, pružaju se bitne smjernice za dizajn, proizvodnju i održavanje tih struktura. Certificiranje plovidbenosti kompozitnih struktura i proizvodnih procesa za zrakoplove temelji se na važećim regulativama i standardima, uključujući FAR 25.603, FAR 25.605, FAR 25.609 i FAR 25.613. Ovi propisi zahtijevaju da svi kompozitni materijali i metode korištene u zrakoplovnoj konstrukciji budu pažljivo kvalificirani i temeljito ispitani kako bi se osigurala njihova pouzdana primjena.

Za dobivanje plovidbenosti kompozitnih struktura zrakoplova, nužno je striktno slijediti norme FAA koje obuhvaćaju sve potencijalno kritične opterećujuće scenarije. Posebna važnost pridaje se ispitivanju statičke čvrstoće same konstrukcije zrakoplova u ovom postupku. Ovo ispitivanje omogućuje provjeru unutarnjih opterećenja koja se predviđaju unutar strukture.

Pored toga, certificiranje također uključuje obavezna ispitivanja otpornosti na sudare, što podrazumijeva simulaciju konfliktnih situacija tijekom manevriranja vozila za prihvata i otpremu, kao i testiranja zaštite kompozitne strukture od požara, zapaljivosti, kao i otpornosti na udar munje. Sve ove procedure osiguravaju da kompozitne strukture u zrakoplovima zadovoljavaju najviše standarde sigurnosti i pouzdanosti.

## 7. Zaključak

U ovom završnom radu predočena je upotreba kompozitnih materijala te njihova ključna uloga u konstrukciji zrakoplova, također je prikazan povijesni razvoj kompozita, osnovna podjela ovih materijala te njihove prednosti i nedostaci. Poseban naglasak stavljen je na složene i hibridne kompozite u kontekstu konstrukcije zrakoplova.

Razvoj i primjena kompozitnih materijala značajno doprinosi napretku suvremenih zrakoplova, omogućavajući im da postanu veći, brži, sposobni prevoziti veći broj putnika, te da imaju dulji dolet. Slojeviti kompoziti, poznati i kao laminati, predstavljaju osnovni gradivni element modernih zrakoplova. Njihova sposobnost kombiniranja različitih materijala kako bi se postigla optimalna čvrstoća uz minimalnu masu igra ključnu ulogu u oblikovanju letjelica. Sendvič konstrukcije, koje koriste lagane materijale poput pjena kao unutarnje jezgre, dodatno povećavaju učinkovitost i čvrstoću zrakoplova. Hibridni kompoziti, kombinirajući različite vrste vlakana i matrica, otvaraju nove dimenzije u postizanju specifičnih zahtjeva čvrstoće i fleksibilnosti.

Raznolikost vrsta vlakana, ključnih gradivnih komponenti kompozita, obuhvaća materijale s različitim svojstvima i primjenama. Pravilan izbor vlakana presudan je za postizanje optimalnih performansi i dugovječnosti u konstrukciji zrakoplova. Matrice, koje okružuju vlakna i prenose opterećenje, imaju ključnu ulogu u očuvanju strukturne stabilnosti kompozita.

Upotreba kompozitnih materijala na suvremenim zrakoplovima je sveprisutna. Najveći proizvođači zrakoplova kao što su Airbus i Boeing sve više se oslanjaju na kompozite kako bi stvorili letjelice visoke učinkovitosti i performansi. U vojnom sektoru, zrakoplovi poput Osprey-a ili F35 koriste kompozitne materijale kako bi povećali svoju agilnost i smanjili detektibilnost na radarima.

Zahtjevi za zrakoplove izrađene od kompozitnih materijala variraju prema geografskim regijama. Europska unija i Sjedinjene Američke Države uspostavili su strog nadzor kroz standarde i testove kako bi osigurali da zrakoplovi izrađeni od kompozitnih materijala udovoljavaju visokim sigurnosnim kriterijima.

Kompozitni materijali igraju ključnu ulogu u razvoju i konstrukciji modernih zrakoplova, omogućujući stvaranje letjelica visokih performansi, lagane i izdržljive strukture. Razumijevanje prednosti, izazova i primjene ovih materijala ključno je za buduće inženjere i stručnjake zrakoplovne industrije, koji će nastaviti oblikovati budućnost zrakoplovstva uz naglasak na ekološku održivost i tehnološke inovacije.

# Literatura

1. Johnson T., *Povijest kompozita*. Preuzeto s: <https://hr.eferrit.com/povijest-kompozita/> [Pristupljeno: 5. kolovoza 2023.]
2. Flake C. Campbell Jr. *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*: 2011. Preuzeto s: <https://www.perlego.com/book/1854227/manufacturing-technology-for-aerospace-structural-materials-pdf?> [Pristupljeno: 5. kolovoza 2023.]
3. Filetin, T., Kovačiček, F., Indof J. *Svojstva i primjena materijala*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2023., str. 231
4. Ćorić D., Filetin T. *Materijali u zrakoplovstvu*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2023., str. 112
5. Academia, *Aircraft Materials, Processes, & Hardware, Chapter 5.*, str. 5-33. Preuzeto s: [https://www.academia.edu/34917729/Chapter5\\_Aircraft\\_Materials\\_Processes\\_and\\_Hardware\\_FAA\\_pdf](https://www.academia.edu/34917729/Chapter5_Aircraft_Materials_Processes_and_Hardware_FAA_pdf) [Pristupljeno: 5. kolovoza 2023.]
6. *Kompozitni materijali*, Preuzeto s: [http://www.ae.metu.edu.tr/~ae469/Advantages%20and%20Disadvantages%20of%20Composite%20Materials\\_Resin%20Systems.pdf](http://www.ae.metu.edu.tr/~ae469/Advantages%20and%20Disadvantages%20of%20Composite%20Materials_Resin%20Systems.pdf) [Pristupljeno: 5. kolovoza 2023.]
7. ScienceDirect, *Laminat od metalnih vlakana*. Preuzeto s: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fibre-metal-laminate> [Pristupljeno: 5. kolovoza 2023.]
8. Ćorić D., Filetin T. *Materijali u zrakoplovstvu*, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2023.
9. Tasuns, *Sendvič konstrukcije*. Preuzeto s: <http://hr.t-composites.net/info/sandwich-structures-22298951.html> [Pristupljeno: 5. kolovoza 2023.]
10. Filetin T., Kovačiček F., Indof J. *Svojstva i primjena materijala*. Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2023., str. 117
11. Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: *Svojstva i primjena materijala*. Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2023., str. 116
12. Smojver I., *Mehanika kompozitnih materijala*. Zagreb, ver. 06, Preuzeto s: <https://docplayer.gr/107881910-Mehanika-kompozitnih-materijala.html> [Pristupljeno: 6. kolovoza 2023.]
13. Filetin T.: *Pregled razvoja i primjene suvremenih materijala*. Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2023.,
14. Airlines, *Airbus A380*. Preuzeto s: [Airliners.net](https://www.airliners.net) [Pristupljeno: 6. kolovoza 2023.]
15. Pora J., *Composite materials of Airbus A380, From History to Future- Airbus, Large Aircraft Division* Preuzeto s: <https://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM13proceedings/SITE/PAPERS/paper-1695.pdf> [Pristupljeno: 6. kolovoza 2023.]
16. Hawk J., *The Boeing 787 Dreamliner: More Than an Airplane*, Preuzeto s: <https://www.scribd.com/doc/24315402/Aners-Hawk> [Pristupljeno: 6. kolovoza 2023.]

17. EASA, *Annex II to ED Decision 2010/003/R of 19/07/2010*. Preuzeto s: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Annex%20II%20-%20AMC%2020-29.pdf> [Pristupljeno: 5. kolovoza 2023.]
18. Modern airliner, *Airbus A350 XWB*. Preuzeto s: <http://www.modernairliners.com/airbus-a350-xwb-introduction/airbus-a350-xwbspecifications/> [Pristupljeno: 5. kolovoza 2023.]
19. ScienceDirect, *Kompozitni laminati*. Preuzeto s: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRo7F0cuEuHnCy-OdN1e5CVPVKULt0QH-I2IFxC573qTCVdzKCzav2yueoCTDRv0s-5aG8&usqp=CAU>, 2023 [Pristupljeno: 7. kolovoza 2023.]
20. ResearchGate, *Kompozitni materijal GLARE*. Preuzeto s: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb>, 2023 [Pristupljeno: 7. kolovoza 2023.]
21. Ćorić D., Filetin T.: *Materijali u zrakoplovstvu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2023., str. 124 [Pristupljeno: 7. kolovoza 2023.]
22. Vidović, A.: *Prezentacija iz Osnova tehnika zrakoplovstva*, Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, ak. God. 2022/23. [Pristupljeno: 7. kolovoza 2023.]
23. ScienceDirect, *Prikaz strukturalnog kompozitnog materijala s jezgrom u obliku pčelinjeg saća*, 2023. Preuzeto s: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRh930m0Nw3KLfFHshnPXq1QOrTelMoPtvlg-HFgt2MWTaDLfTJsiTd44iqooR0fBZ3reg&usqp=CAU>, 2023. [Pristupljeno: 7. kolovoza 2023.]
24. ScienceDirect, *Dijelovi sendvič konstrukcije u obliku pčelinje saće na zrakoplovu Airbus A380*, 2023. Preuzeto s: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRdITX2NWx74t64-UGAnAWvc1Fz7VzYLS79Zw&usqp=CAU>, 2023 [Pristupljeno: 7. kolovoza 2023.]
25. Ćorić D., Filetin T.: *Materijali u zrakoplovstvu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu; 2023. str 130 [Pristupljeno: 7. kolovoza 2023.]
26. Airbus, *Composite Engineering Manual*, Preuzeto s: <https://aircraft.airbus.com/en> 2023. [Pristupljeno: 7. kolovoza 2023.]
27. Appropedia, *Kompoziti u zrakoplovnoj industriji*. Preuzeto s: <http://www.appropedia.org/images/d/d7/Composites01.jpg>, 2023. [Pristupljeno: 7. kolovoza 2023.]
28. Winair, *Vrhunski vodič kroz infografiku Bell Boeing V-22 Osprey*, 2023. Preuzeto s: <https://th.bing.com/th/id/OIP.Xg-liqrAymegdbJdPCDwwgHaE8?w=280&h=187&c=7&r=0&o=5&dpr=1.3&pid=1.7>, 2023 [Pristupljeno: 7. kolovoza 2023.]



## Popis slika

Slika 1. Osnovni tipovi kompozita: (a) kompoziti s česticama; (b) kompoziti s vlaknima; (c) slojeviti kompoziti.....	4
Slika 2. Prikaz slojevitog kompozita .....	6
Slika 3. Kompozitni materijal GLARE .....	7
Slika 4. Postupak proizvodnje "GLARE" laminata .....	8
Slika 5. Airbus A380 .....	8
Slika 6. Prikaz strukturalnog kompozitnog materijala s jezgrom u obliku pčelinjeg saća.....	9
Slika 7. Dijelovi sendvič konstrukcije u obliku pčelinje saće na zrakoplovu Airbus A380.....	10
Slika 8. Temeljna svojstva ugljičnih, staklenih, aramidnih vlakana i vlakana od kvarca na zrakoplovu A320 .....	13
Slika 9. Rasporedi vlaknastih ojačala .....	13
Slika 10. Airbus A380 .....	15
Slika 11. CFRP kompoziti na dijelovima A380.....	17
Slika 12. Konstrukcijski materijal zrakoplova Airbus A350 XWB.....	17
Slika 13. Boeing B787 Dreamliner .....	18
Slika 14. Materijali korišteni na zrakoplovu Boeing 787 Dreamliner .....	19
Slika 15. Bell-Boeing V-22 Osprey.....	20

## Popis tablica

Tablica 1. Svojstva hibridnih kompozita.....	11
Tablica 2. Operativne mase zrakoplova A380.....	16
Tablica 3. Operativne mase zrakoplova Boeinga B787 Dreamliner .....	18
Tablica 4. Operativne mase Bell-Boeing V-22 Osprey .....	20

Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je Završni rad  
(vrsta rada)  
isključivo rezultat mojega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da 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/diplomskog rada pod naslovom Primjena kompozitnih materijala u konstrukciji zrakoplova, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 29.08.2023

Josip Šimić  
(ime i prezime, potpis)