

# Primjena kompozitnih materijala u elementima konstrukcije zrakoplova

---

**Stančić, Tibor**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*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:119:981392>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-13**



*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Tibor Stančić**

**Primjena kompozitnih materijala u elementima konstrukcije  
zrakoplova**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, 2019.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**  
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 12. ožujka 2019.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**  
Predmet: **Zrakoplovna prijevozna sredstva**

## ZAVRŠNI ZADATAK br. 4985

Pristupnik: **Tibor Stančić (0135242725)**  
Studij: **Aeronautika**  
Smjer: **Kontrola leta**

Zadatak: **Primjena kompozitnih materijala u elementima konstrukcije zrakoplova**

### Opis zadatka:

Uvodno opisati bitne značajke materijala zrakoplovnih konstrukcija, s naglaskom na kompozitne, u usporedbi s ostalima. Navesti konstrukcijske cjeline zrakoplova i opisati njihove osnovne značajke. Opisati glavna opterećenja konstrukcijskih cjelina zrakoplova, kao podlogu za izbor kompozitnih materijala. Na primjerima zrakoplova Boeinga B787 Dreamlinera i Airbusa A350 opisati konstrukcijsku primjenu kompozitnih materijala. Analizirati prednosti i mane primjene kompozita za glavne sklopove zrakoplova, po kriterijima bitnih svojstava materijala te performansi, učinkovitosti i sigurnosti zrakoplova. Zaključno definirati temeljne značajke kompozitnih materijala kao kriterij za izbor zrakoplova.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



prof. dr. sc. Željko Marušić

**Sveučilište u Zagrebu**  
**Fakultet prometnih znanosti**

Završni rad

**Primjena kompozitnih materijala u elementima konstrukcije  
zrakoplova**

**Application of Composite Materials in Aircraft Construction  
Elements**

Mentor: prof. dr. sc. Željko Marušić

Student: Tibor Stančić

JMBAG: 0135242725

Zagreb, rujan 2019.

## SAŽETAK

Tehnologija je svojim razvojem omogućila mnoga razvijanja u raznim granama industrije. Zrakoplovna industrija se kroz povijest brzo razvijala te je jedna od jačih grana prometa, a zrakoplovi te njihove konstrukcije su jedan od razloga zašto je zrakoplov među najsigurnijim načinima putovanja. Uvijek se traže novije, bolje ideje što u konačnici rezultira i boljim produktom. Ni materijali nisu izuzetak, te su se uvijek tražili oni sa boljim karakteristikama jer razvojem materijala su se poboljšavale konstrukcije, a i same performanse zrakoplova. Od drva, koje je u prošlosti bilo najzastupljeniji materijal, pa preko aluminijske, titanske, čelike i njihovih raznih legura došlo se do kompozitnih materijala koji kao novi materijali omogućuju bolje kvalitete zrakoplova. Glavni cilj svim proizvođačima je napraviti što lakši zrakoplov, a da pritom zrakoplov ne izgubi na performansama. Pojavom kompozita ne samo da smanjuju masu zrakoplova već i povećavaju ukupne performanse zrakoplova zbog svojstva koje sadrže i čime konkuriraju dosadašnjim materijalima. Koliko su se razvili i koliko su konkurentni pokazuje i činjenica da su sve više zastupljeniji u zrakoplovnim konstrukcijama te u nekim zrakoplovima i preko 50%. Konstruirati zrakoplov nije lagano jer se on susreće sa mnogim opterećenjima i naporima te treba pripaziti pri izboru materijala jer pogreške mogu skupo koštati.

### KLJUČNE RIJEČI:

Materijali; kompozitni materijali; zrakoplov; zrakoplovna konstrukcija; opterećenja na konstrukcijama

## SUMMARY

Technology has enabled many developments in various industries. The aviation industry has evolved rapidly over history and is one of the strongest branches of traffic, and aircraft and their constructions are one of the reasons why aircraft are among the safest modes of travel. There is always search for newer, better ideas that ultimately results in a better product. Materials are no exception, and those with better characteristics have always been looked for because the development of materials has improved the structures and performance of the aircraft itself. From wood, which used to be the most common material in the past, through aluminum, titanium, steel and their various alloys, composite materials have emerged that, as new materials, provide better aircraft qualities. The main goal for all manufacturers is to make the aircraft as lightweight as possible without losing the aircraft performance. The advantage of composites not only reduces the mass of aircraft, but also increases the overall performance of aircraft due to the properties they contain and thus compete with current materials. How much they have evolved and how competitive they are is also shown by the fact that they are increasingly represented in aircraft structures and in some aircraft over 50%. It is not easy to design an aircraft because it is subject to many stresses and loads, and care must be taken when selecting materials because mistakes can be expensive.

## KEY WORDS:

Materials; composite materials; airplane; aircraft construction; loads on structures

# SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	MATERIJALI U ZRAKOPLOVNIM KONSTRUKCIJAMA.....	3
2.1.	Drvo.....	4
2.2.	Aluminij.....	4
2.3.	Čelik.....	5
2.4.	Titan.....	6
3.	KOMPOZITNI MATERIJALI.....	8
3.1.	Matrica.....	8
3.1.1.	Polimerna matrica.....	9
3.1.2.	Metalna matrica.....	9
3.1.3.	Keramička matrica.....	9
3.2.	Ojačalo.....	10
3.2.1.	Česticama ojačani.....	10
3.2.2.	Ojačani vlaknima.....	10
3.2.3.	Strukturni kompoziti.....	11
3.3.	Prednosti kompozita.....	12
3.4.	Nedostaci kompozita.....	14
4.	ZRAKOPLOVNE KONSTRUKCIJE.....	16
4.1.	Trup.....	16
4.1.1.	Vrste trupa.....	16
4.1.2.	Proračun opterećenja trupa (klasični i kompozitni zrakoplov).....	17
4.1.3.	Prozor trupa.....	22
4.2.	Krilo.....	23
4.3.	Repne površine.....	25
4.4.	Stajni trap.....	26
4.5.	Pogonski sustav.....	27
5.	KOMPOZITNI MATERIJALI U ZRAKOPLOVIMA.....	30
5.1.	<i>Boeing B787 Dreamliner</i> .....	31
5.2.	<i>Airbus A350</i> .....	32
6.	PREGLED I POPRAVCI KOMPOZITNIH MATERIJALA.....	35
6.1.	Metode <i>Non-destructive testing</i> (NDT).....	35
6.2.	<i>Structural Health Monitoring</i> (SHM).....	37
6.3.	Popravak kompozitnih materijala.....	39
7.	ZAKLJUČAK.....	40
	POPIS LITERATURE.....	41
	POPIS SLIKA.....	43
	POPIS TABLICA.....	44

# 1. UVOD

Zrakoplovna industrija kroz povijest uvijek teži poboljšanju performansi zrakoplova bili oni komercijalni ili vojni. Stalno pokreću razvoj poboljšanih struktura zrakoplova koristeći materijale koji imaju odlična svojstva. Kompozitni materijali su jedna takva klasa materijala koji igraju značajnu ulogu u trenutnim i budućim zrakoplovnim komponentama. Posebno su atraktivni za zrakoplovne i zrakoplovne konstrukcije zbog svoje izuzetne čvrstoće i male mase te ostalih odličnih fizičkih svojstava. Kompozitni materijali u osnovi su kombinacija dvaju ili više različitih materijala koji se zajedno koriste kako bi se kombinirala najbolja svojstva ili dala novi skup karakteristika koje niti jedan sastavni materijal ne bi mogao sam postići.

Cilj ovog završnog rada je prikazati svojstva kompozitnih materijala usporedno sa prijašnjim materijalima koji se koriste u konstrukcijama zrakoplova tj. kroz prikaz zrakoplovne konstrukcije pokazati koja sve opterećenja i napori se pojavljuju te da li kompoziti stvarno omogućuju bolju primjenu. Rad je podijeljen u 7 poglavlja:

1. Uvod
2. Materijali u zrakoplovnim konstrukcijama
3. Kompozitni materijali
4. Zrakoplovne konstrukcije
5. Kompozitni materijali u zrakoplovima
6. Pregled i popravci kompozitnih materijala
7. Zaključak

U uvodnom poglavlju ukratko se objašnjava tema rada te se definiraju poglavlja koja će biti obuhvaćena u radu.

U drugom poglavlju se definira što su to materijali, koja su glavna svojstva materijala te se pobliže prikazuju najkorišteniji materijali u zrakoplovnim konstrukcijama.

U trećem poglavlju se opisuje i definira što je to kompozit, od čega je napravljen, koje su podvrste kompozita te prednosti i nedostaci kompozita.



U četvrtom poglavlju prikazane su zrakoplovne glavne cjeline i kako su konstruirane, tj. upoznaje ih se поближе gledajući sa konstrukcijskog aspekta. Objasnjeno je kakva opterećenja svaka cjelina doživljava te da li kompoziti mogu biti korišteni za tu određenu konstrukciju ili ipak neki drugi materijal.

U petom poglavlju na primjeru dva zrakoplova se prikazuje korištenje kompozitnih materijala te njihova zastupljenost usporedno sa drugim materijalima.

U šestom poglavlju objašnjeno je kako se pregledavaju i popravljaju kompoziti, zato što se oštećenja teško uočavaju i to predstavlja glavnu manu ovih materijala.

U sedmom, zaključnom poglavlju, će se ukratko prikazati zaključci o temi rada.

## 2. MATERIJALI U ZRAKOPLOVNIM KONSTRUKCIJAMA

Materijali koji se koriste u proizvodnji zrakoplova bitno su se promijenili od konstrukcije prvog zrakoplova. S ciljem letenja zrakom, odupirući se gravitacijskoj sili, materijali korišteni za izgradnju zrakoplova moraju imati malu težinu, visoku specifičnu čvrstoću, otpornost na toplinu, otpornost na opterećenje, otpornost na pukotine i koroziju. U to doba zrakoplovi su bili konstruirani od drveta i tkanina. No zrakoplovi koji se sastoje od drva i tkanine podvrgnuti su brzom propadanju i velikom održavanju. Tako je započela potraga za boljim materijalima. U gradnji zrakoplovnih konstrukcija u prednosti su aluminij, čelik, titan i kompozitni materijali.

Prilikom izgradnje zrakoplovne konstrukcije najbitnije je proučiti s kakvim se opterećenjima susreće zrakoplov tijekom leta i na temelju toga izabrati najprikladniji materijal uzevši u obzir karakteristike materijala.

Sile opterećenja na zrakoplovnu konstrukciju uzrokuju da se elementi razvlače, stlaču, izvijaju, raslojavaju, mrve ili čak pucaju. Upravo zbog toga potrebno je poznavati osobine svakog pojedinog materijala. Osnovne osobine materijala su: čvrstoća (sposobnost materijala da bez otkaza podnese i odupre se djelovanju vanjske primijenjene sile), elastičnost (sposobnost materijala da se povrati u početni oblik i dimenzije nakon što na njega prestanu djelovati sile), plastičnost (obrnuti pojam od elastičnosti), rastezljivost (sposobnost materijala da se deformira bez pucanja) i krutost (obrnuti pojam od rastezljivosti). Tijekom konstruiranja konstrukcije također postoje dva omjera koja se ne smiju izostaviti, a to su:

- *“Strength to weight ratio”* (SWR) – opisuje čvrstoću materijala
- *“Stiffness to weight ratio”* – opisuje krutost materijala

Što su veći omjeri, veća je i čvrstoća i krutost materijala. U tablici 1. prikazane su gustoća, čvrstoća i SWR materijala koji se najčešće koriste u zrakoplovnim konstrukcijama. Može se primjetiti da je čelik najgušći i najčvršći materijal, a kompozitni materijali imaju najbolji SWR.[1]

**Tablica 1.** Materijali i njihove karakteristike [1]

Materijal	Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )	Čvrstoća (N/mm <sup>2</sup> )	SWR
Legure aluminija	2.80	420	150
Čelik	7.85	1160	148
Legure titana	4.43	900	203
Legure nikla	7.5	960	128
Kompoziti	1.4	920	657

## 2.1. Drvo

Drvo je najstariji tradicionalni materijal koji se upotrebljava u zrakoplovnim konstrukcijama. Ima malu specifičnu težinu i dobru lokalnu otpornost elemenata, lako i jeftino se obrađuje u raznovrsne oblike, visoko je otporan na zamor materijala te ima nisku nabavnu cijenu, a također ima SWR otprilike kao i legure aluminija. Ipak je malo zastupljen u modernim zrakoplovima, jer noviji materijali su bolji i praktičniji te imaju sveukupno gledajući bolja svojstva. Drvo za početak previše upija vlagu tj. podložan je jako atmosferskim utjecajima te ima organske mane (čvorovi, pukotine, uvijanja, crvotočine). Zanimljivo je da tijekom drugog svjetskog rata u nekim zemljama je bila nestašica tvornica i radnika koji su proizvodili metal, stoga su u pomoć priskočili radnici iz industrije namještaja te su tada Sovjeti bili u prednosti u odnosu na Nijemce koji su imali zrakoplove cijele od metala.[2]

## 2.2. Aluminij

Aluminij se koristi zbog male gustoće (2,7 g/cm<sup>3</sup>), visokih svojstava čvrstoće, dobre toplinske i električne vodljivosti, tehnološke učinkovitosti i visoke otpornosti na koroziju. Aluminij gubi čvrstoću na visokim temperaturama, pa se ne koristi se na površini zrakoplova. Za razliku od visokih temperatura, na niskim temperaturama njegova čvrstoća se povećava te ga čini vrlo korisnim materijalom u ovoj industriji, zato što zrakoplovi lete na visinama gdje temperatura zraka može biti i -50°C. Veoma je lagan materijal što je isto prednost, je proizvođači teže u proizvodnji što lakših zrakoplova. Pojavom kompozitnih materijala i drugih materijala od nemetala, aluminij nije više toliko u prvom planu i pri proizvodnji elemenata nije zastupljen ko i prije. Dobar SWR i niska cijena u odnosu na nove materijale i dalje drži aluminij u konkurenciji sa novijim materijalima te je teško da će u potpunosti nestati iz zrakoplovnih konstrukcija.[3]

Postoje razne vrste aluminijskih legura od kojih je najznačajnija aluminij-litij legura. Značajne prednosti u smanjenju težine i povećanoj čvrstoći stavljaju napredne legure aluminij-litija na čelo istraživanja materijala. Te se legure razvijaju kako bi ispunile sve veću potrebu za velikom čvrstoćom, visokim svojstvima, laganom težinom i isplativošću u zrakoplovnoj industriji. Konvencionalne legure aluminija već su dugo u uporabi u zrakoplovnoj primjeni. Dodavanje litija u aluminij poboljšava elastičnost i smanjuje gustoću u usporedbi s konvencionalnim aluminijskim legurama. Unaprijeđenjem ove legure, došlo se do izvrsnih svojstava u pogledu smanjenja težine elemenata, dobre otpornosti na koroziju, na pucanje i zamor materijala, izvrsne čvrstoće i žilavosti, poboljšanja termičkih svojstava, kao i kompatibilnost pri tehnikama izrade.[4]

Razvijanje te legure te poboljšanje iste nije slučajno, jer je prizašlo kao odgovor na kompozitne materijale koji su sve više zastupljeniji u proizvodnji. U očekivanju velike potražnje, Alcoa (sada Arconic)<sup>1</sup> uložila je 90 milijuna američkih dolara u najveću svjetsku tvornicu za proizvodnju Al-Li u Lafayette u državi Indiana, gdje godišnje proizvodi preko 20 000 tona Al-Li slitina. Imaju objekte koji su sposobni dovoljno da mogu napraviti bilo koju jednodijelnu komponentu na današnjem zrakoplovu. Jednodijelni dijelovi čine konstrukcije jačim, lakšim i jeftinijim jer smanjuju broj složenih spojeva. Prije rascjepa, Alcoa je proširila i još jedan pogon Al-Li, smješten u Gornjem Burrellu u Pensilvaniji. Nadogradnja je napravljena u očekivanju da će novi Boeingov model 777-9 sve više koristiti Al-Li legure.[4]

Izravni konkurent ove legure su kompozitni materijali koji i dalje imaju malu prednost nad ovom legurom jer su nešto jeftiniji od nje, ali kada se govori o održavanju, sastavljanju dijelova, tvornica i mehaničara, koji su mnogo obučeni i iskusniji pri radu s metalnim konstrukcijama, vodeću ulogu vode legure aluminija.

### 2.3. Čelik

Čelik je tehničko željezo koje sadrži 0,05 do 1,7% ugljika, te se daje kovati, valjati, zavarivati. Sadrži i određenu količinu silicija, mangana, sumpora i fosfora. Temeljni način dobivanja čelika iz bijeloga sirovog željeza je u tome da se oksidacijom smanji ugljik i druge primjese, pa se zato dodaje kisik iz zraka ili iz oksida željeza. Oksidacija se obavlja na temperaturi 1400°C do 1500°C i vrlo je burna i brza.[5]

---

<sup>1</sup> Arconic je tvrtka specijalizirana za inženjering i proizvodnju lakih metala

Čelik (slika 1.) može biti i do četiri puta jači i tri puta tvrdi od aluminija, ali je i tri puta teži. U kombinaciji s kromom nastaje legura čelika i kroma koja se naziva nehrđajući čelik. Čvrstoća nehrđajućeg čelika izravno je povezana s količinom kroma koja se nalazi u leguri. Upotrebljava se za određene sastavne dijelove kao što su prizemni mehanizmi, gdje su čvrstoća i tvrdoća osobito važni. Koristi se i za kožu nekih brzih zrakoplova jer čvrstoću drži na višim temperaturama boljom od aluminija. Zbog svoje snage, tvrdoće i otpornosti na toplinu, idealan je za upotrebu na površini kože zrakoplova i u prizemlju (ponajviše za stajni trap), a obično sadrži oko 11-13 posto materijala koji se koristi u zrakoplovu. Trajnost čelika najvažnije je njegovo obilježje u proizvodnji zrakoplova i iako je teži od ostalih materijala, često se koristi za šarke, kabele i učvršćivače gdje je njegova čvrstoća ključna.[6]



**Slika 1.** Čelik u konstrukciji stajnog trapa

## 2.4. Titan

Titan i njegove legure su materijali koji se pojavljuju u zrakoplovstvu zbog toga što imaju slične karakteristike s čelikom, otprilike je jak poput čelika i teži manje, iako nije tako lagan kao aluminij. Čvrsto drži kod visokih temperatura i odolijeva koroziji bolje od čelika ili aluminija te dobre je žilavosti. Iako je titan skup i skuplji od svih navedenih materijala te i troškovi obrade vrlo su visoki, ove karakteristike dovele su do njegove veće upotrebe u modernim zrakoplovima.[8]

Postojan je na zraku i u morskoj vodi, otporan na djelovanje mnogih kemikalija. Veoma značajan je u proizvodnji nekih tehničkih važnih slitina, potrebnih osobito u zrakoplovnoj industriji.[5]

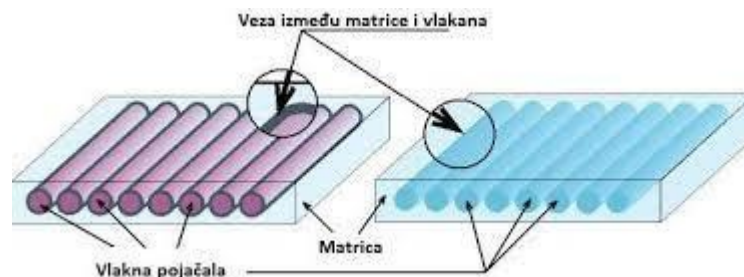
Koristi se za izradu dijelova koji su mehanički i toplinski opterećeni, kao npr. u izradi mlaznog motora. Može se koristiti i za izradu malih dijelova kao zatezača pa sve do nosača krila i vojnih trupova (na slici 2. je prikaz titana u upotrebi i to do 80%) i putničkih zrakoplova te se također može naći u sklopovima panela i okretnih krila, hidrauličkim sustavima i ostalim dijelovima.[9, 10]



**Slika 2.** SR – 71 [10]

### 3. KOMPOZITNI MATERIJALI

Kompozitni materijali nastaju kombiniranjem dvaju ili više materijala koji imaju sasvim različita svojstva. Različiti materijali djeluju zajedno kako bi dobili kompozit jedinstvena svojstva, ali unutar kompozita različiti materijali se mogu lako rastaviti - oni se ne otapaju i ne stapaju jedan s drugim (slika 3.). Većina kompozita sastoji se od samo dva materijala. Jedan materijal (matrica ili vezivo) okružuje i veže gomilu vlakana ili fragmenata mnogo jačeg materijala (ojačalo). [11]



Slika 3. Struktura kompozita [12]

Tijekom posljednjih desetljeća razvijeno je mnogo novih kompozita, od kojih neki imaju vrlo vrijedna svojstva. Pažljivim odabirom ojačala, matrice i proizvodnog procesa koji ih spaja, inženjeri mogu prilagoditi svojstva kako bi ispunili specifične zahtjeve. Oni, na primjer, mogu učiniti složeni lim vrlo jakim u jednom smjeru tako da vlakna usklade na taj način, ali slabije u drugom smjeru, gdje čvrstoća nije toliko bitna. Oni također mogu odabrati materijal koji ima svojstva kao što su otpornost na toplinu, kemikalije i vremenske neprilike izborom odgovarajućeg materijala za matricu.

#### 3.1. Matrica

Matrica podupire ojačala i drži ih zajedno, prenosi opterećenja između vlakana, daje složenoj komponenti njezin oblik i određuje kvalitetu površine. Kompozitna matrica može biti polimer (plastika), keramika, metal ili ugljik. Polimerne matrice najčešće se koriste za kompozite u komercijalnim i visoko učinkovitim zrakoplovnim primjenama. Keramičke i metalne matrice obično se koriste u okruženjima s visokim temperaturama, poput motora. Ugljik kao matrica koristi se također u ekstremno visokim temperaturama, kao što su kočnice i raketne mlaznice.[13]

### 3.1.1. Polimerna matrica

Kompoziti polimernih matrica (PMC) mogu se podijeliti u tri podvrste, naime, termoset, termoplastični i gumeni. Polimer je velika molekula sastavljena od ponavljajućih strukturnih jedinica povezanih kovalentnim kemijskim vezama. PMC se sastoje od polimernog matriksa u kombinaciji s vlaknastom armirajućom disperznom fazom. Jeftiniji su s lakšim metodama izrade. PMC-ovi su manje gušći od metala ili keramike, mogu se oduprijeti atmosferskim i drugim oblicima korozije i pružiti vrhunsku otpornost na provođenje električne struje.[14]

### 3.1.2. Metalna matrica

Kompoziti metalnih matrica (MMC) su kompozitni materijali koji sadrže najmanje dva sastavna dijela - metal i drugi materijal ili drugačiji metal. Metalna matrica ojačana je ostalim materijalom za poboljšanje čvrstoće i potrošnju materijala. Tamo gdje su prisutna tri ili više sastavnih dijelova, naziva se hibridnim kompozitom. U strukturnim primjenama, matrica se obično sastoji od lakšeg metala, poput magnezija, titana ili aluminija. U primjenama na visokoj temperaturi uobičajene su matrice kobalta i kobalt-nikla. Tipična MMC proizvodnja uglavnom se dijeli na tri vrste: krute, tekuće i isparene. Kontinuirani ugljik, silicij-karbid ili keramička vlakna neki su od materijala koji se mogu ugraditi u metalni matrični materijal. MMC su otporni na vatru, rade u širokom rasponu temperatura, ne apsorbiraju vlagu i imaju bolju električnu i toplinsku provodljivost. Otkrilo se da su aplikacije otporne na oštećenja od zračenja i da ne trpe posljedice. Većina metala i legura izrađuje dobre matrice za složene primjene.[14]

### 3.1.3. Keramička matrica

Keramički matrični kompoziti (CMC) su podskupina kompozitnih materijala. Sastoje se od keramičkih vlakana ugrađenih u keramičku matricu, te na taj način čine materijal ojačan keramičkim vlaknima (CFRC). Matrica i vlakna mogu se sastojati od bilo kojeg keramičkog materijala. CMC materijali dizajnirani su za prevladavanje glavnih nedostataka poput niske žilavosti na lom, krhkosti i ograničene otpornosti na termički udar s kojima se susreće tradicionalna tehnička keramika.[14]



## 3.2. Ojačalo

Uloga ojačala u kompozitnom materijalu u osnovi je povećavanje mehaničkih svojstava cijelokupnog kompozita. Sva različita vlakna koja se koriste u kompozitima imaju različita svojstva i na različit način utječu na svojstva kompozita. Osiguravaju visoku čvrstoću, visoki modul elastičnosti - krutost, te otpornost kompozita na trošenje. Pojavljuju se u obliku čestica ili vlakana različitih dimenzija i oblika tj. mogu biti čestično ojačani, ojačani vlaknima te strukturni kompoziti.[15, 16]

### 3.2.1. Česticama ojačani

U osnovi postoje dvije vrste kompozita ojačanih česticama, kompoziti ojačani velikim česticama i kompoziti ojačani malim česticama. Nisu strogo fizikalne dimenzije čestica po kojima se materijali klasificiraju, već je to mehanizam ojačanja. Čestice su jednoliko raspoređene unutar matrice u svim smjerovima. Čestice mogu poboljšati čvrstoću na lom kompozita u odnosu na matricu spriječavanjem širenja pukotina kroz matricu, bilo fizički blokiranjem i zaustavljanjem pukotina, bilo preusmjeravanjem i cijepanjem kako bi se spriječilo njihovo napredovanje. Oni također mogu poboljšati krutost i čvrstoću kompozita u odnosu na matricu, noseći teret opterećenja.[17]

### 3.2.2. Ojačani vlaknima

Visoka mehanička svojstva vlakana rezultat su snažnih međuatomarnih sila koje vladaju u materijalima niskog atomskog broja i male gustoće. Vlaknima ojačani kompoziti sastoje se od matrice i ojačala uglavnom vlaknastog oblika visoke krutosti i čvrstoće koja su povezana sa žilavom i duktilnom smolom. Ovisno o rasporedu vlakana variraju mehanička i tehnička svojstva. Mala težina, nezapaljivost i ograničenost prema gorivosti pogodna su za uporabu kompozita u zrakoplovstvu. Najbolja fizikalna i mehanička svojstva imaju ugljična, staklena i aramidna vlakna.[18]

#### a) Ugljična vlakna

Danas su zasigurno ugljična (karbonska) vlakna najrasprostranjenija, posebice kod mehanički najopterećenijih zrakoplovnih konstrukcija. Prva ugljična vlakna bila su napravljena iz *rayona*, no postupak je ubrzo izbačen zbog malog postotka ugljika koji se na taj način

dobivao, kao i slabih mehaničkih svojstava. Većina ugljičnih vlakana koja se koriste u zrakoplovnim i drugim konstrukcijama su napravljena iz poli-akrilonitril (PAN) vlakana ili iz različitih smola procesom karbonizacije, pri čemu se postupci proizvodnje mogu značajno razlikovati. PAN postupkom se proizvode vlakna s postotkom ugljika do 50%, dok se vlakna iz smole odlikuju postotkom do 80%. Ugljična vlakna imaju visoku čvrstoću, visok modul elastičnosti, znatno više su porozna što utječe dodatno na čvrstoću te imaju dobru električnu vodljivost. Najčešće korišten kompozitni materijal u zrakoplovstvu je CFRP (*Carbon fibre reinforced polymer*), odnosno kompozitni materijal ojačan vlaknima ugljika. Iznimno je čvrst i lagan, no skup u proizvodnji.[18]

#### b) Staklena vlakna

Staklena se vlakna proizvode najčešće od silike (silicijevog dioksida) različitim postupcima i u pravilu imaju slabija mehanička svojstva od ugljičnih vlakana. Vrlo su raširena u primjeni kod mehanički manje zahtjevnih konstrukcija zbog njihove manje cijene. Mogu se znatno razlikovati po svojstvima te se stoga označavaju na razne načine: A-staklo (ovakva su bila prva proizvedena vlakna, danas se vrlo rijetko koriste), C-staklo (koriste se zbog poboljšane otpornosti na kiseline i lužine), E-staklo (najčešće korišteno, poboljšana otpornost na vlagu i blaže kemikalije), S-staklo (povećane čvrstoće i modula elastičnosti, koriste se kod mehanički opterećeniji konstrukcija gdje su potrebni visoka specifična krutost i čvrstoća).[18]

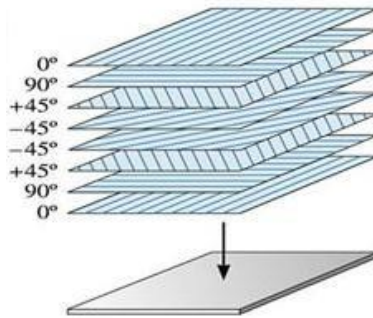
#### c) Aramidna vlakna

Aramid je polimerni aromatski amid. Kevlar je posebno rabljeni aramid. Vrlo je teško rukovati, jer je jedino učinkovito otapalo koncentrirana sumporna kiselina. Kevlar je izrađen od lakih atoma, ali je vrlo jak i fleksibilan, iste težine, a pet puta jači od čelika. Njegova snaga dolazi iz načina poravnanja polimernih lanaca, a molekule su spojene vodikovim vezama. Ova vlakna, koja su već snažna, koriste se kao punilo u ARPC-ima (*aramid reinforced polymers composit*) sa fenolnom smolom ili epoksi smolom kao matricom. Posebno su korisni tamo gdje se energija mora apsorbirati i raspršiti, a također se mogu oduprijeti abraziji.[17]

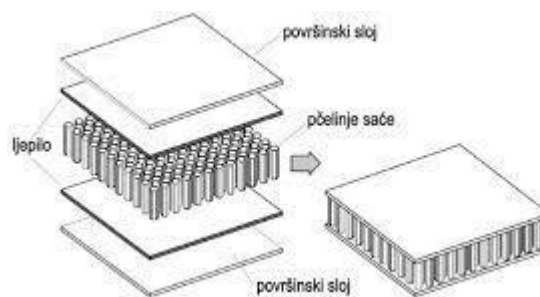
### 3.2.3. Strukturni kompoziti

Pojavljaju se u dva osnovna oblika: laminatne konstrukcije (slojevite) i sendvič konstrukcije. Laminatne konstrukcije su građene samo od laminatnih slojeva i smole, a sendvič konstrukciju čini jezgra spojena između dva tanka homogena ili laminatna sloja. Iako su jezgra i vanjski

slojevi zasebni dijelovi sa različitim svojstvima, međusobnim povezivanjem čine kompaktnu cjelinu. Laminatne konstrukcije su listovi (paneli) s različitom orijentacijom smjerova, velike su čvrstoće, složeni i lijepljeni, što stvara materijal s više izotropne čvrstoće u ravnini (slika 4.). Primjeri su šperploča i moderne skije. Sendvič konstrukcije su čvrsti i kruti listovi spojeni na laganu jezgrenu strukturu, na primjer saće (slika 5.) koja pruža čvrstoću na smicanje. Koristi se u krovovima, zidovima i zrakoplovnim konstrukcijama.[19]



**Slika 4.** Slaganje suprotno orijentiranih listova [20]



**Slika 5.** Pčelinje saće [21]

### 3.3. Prednosti kompozita

Prednosti kompozita su: [22]

a) Lagani materijal

Kompoziti su male težine u odnosu na drvo i metal. Njihova lakoća, na primjer, važna je u zrakoplovima, gdje manja težina znači bolju potrošnju goriva (više milja po galonu). Ljudi koji dizajniraju zrakoplove uvelike su zaokupljeni težinom, jer smanjenje težine smanjuje količinu goriva koja mu treba i povećava brzinu koju može postići. Neki moderni zrakoplovi izgrađeni su s više kompozita nego metala, uključujući novi *Boeing 787 Dreamliner*.

#### b) Velika čvrstoća

Kompoziti se mogu oblikovati tako da su daleko jači od aluminija ili čelika. Metali su podjednako snažni u svim smjerovima, ali kompoziti mogu biti projektirani i dizajnirani tako da su snažni u određenom smjeru.

#### c) SWR („*strenght to weight ratio*“)

Omjer snage i mase je snaga materijala u odnosu na to koliko teži. Neki materijali su vrlo čvrsti i teški, poput čelika. Ostali materijali mogu biti jaki i lagani, poput bambusovih stupova. Kompozitni materijali mogu biti dizajnirani tako da budu jaki i lagani. Ovo svojstvo je zbog čega se kompoziti koriste za izgradnju zrakoplova za koje je potreban materijal velike čvrstoće u najmanjoj mogućoj težini. Na primjer, može se napraviti složeni otpor koji se savija u jednom smjeru. Kad se nešto gradi s metalom, a potrebna je veća čvrstoća u jednom smjeru, materijal se obično mora učiniti debljim, što dodaje težinu. Kompoziti mogu biti jaki, a da ne budu teški. Kompoziti danas imaju najveći omjer čvrstoće i mase u strukturama.

#### d) Otpornost na koroziju

Kompoziti su otporni na vremenske nepogode i oštre kemikalije koje mogu nagristi druge materijale. Kompoziti su dobar izbor za rukovanje ili skladištenje kemikalija. Na otvorenom izdržavaju teška vremena i velike promjene temperature.

#### e) Otpornost na udare

Kompoziti se mogu apsorbirati od udara - na primjer, nagle sile metka ili od eksplozije. Zbog ovog svojstva kompoziti se koriste u neprobojnim prslucima i pločama, kao i za zaštitu zrakoplova, zgrada i vojnih vozila od eksplozija.

#### f) Fleksibilnost dizajna

Kompoziti se mogu oblikovati u komplicirane oblike lakše nego kod većine drugih materijala. To dizajnerima daje slobodu za stvaranje gotovo bilo kojeg oblika. Materijali se lako mogu oblikovati u složene oblike, koji poboljšavaju dizajn, a snizuju troškove. Površina kompozita također se može oblikovati tako da oponaša bilo koji oblik površine ili tekture, od glatke do šljunčane.

#### g) Stabilnost dimenzija

Kompoziti zadržavaju oblik i veličinu kada su vrući ili hladni, vlažni ili suhi. S druge strane drvo nabubri i skuplja se kako se vlaga mijenja. Kompoziti mogu biti bolji izbor u situacijama kada je potrebno usko uklapanje koje ne varira. Primjerice, koriste se u krilima zrakoplova, tako da se oblik i veličina krila ne mijenjaju kako ravnina dobije ili gubi visinu.

#### h) Nprovodni

Kompoziti su neprovodni, što znači da ne provode električnu energiju. Ovo svojstvo čini ih pogodnim za predmete poput električnih uslužnih stupova i elektroničkih ploča. Ako je potrebna električna vodljivost, moguće je složiti takav kompozit koji će provoditi električnu energiju.

#### i) Izdržljiv

Konstrukcije izrađene od kompozita imaju dug životni vijek i malo im je potrebno za održavanje. Ne zna se koliko dugo kompoziti traju, jer mnogim originalnim kompozitima životni vijek još traje. Mnogi su kompoziti u funkciji već pola stoljeća.

### 3.4. Nedostaci kompozita

Kompoziti kao i svaki drugi materijali imaju svoje mane tj. nedostatke pa je tako visoka cijena problem što se tiče njih, ali dugoviječni rok trajanja kompenzira visoku cijenu jer ga ne treba često zamijenjivati kao neke druge materijale. Jedan od najvažnijih je i nedostatak vizualnog dokaza oštećenja. Kompoziti reagiraju različito od ostalih građevinskih materijala na udar, a često nema očiglednih znakova oštećenja. U kompozitnoj strukturi niskoenergetski utjecaj, poput udara, možda neće ostaviti vidljivi znak utjecaja na površinu, ali ispod mjesta udara mogu se stvoriti velika razdvajanja koja se šire u obliku stožaca na mjestu udara. Oštećenja na stražnjoj strani konstrukcije mogu biti značajna i velika, ali mogu biti skrivena od pogleda. Kad god postoji i najmanja slutnja da je materijal možda oštećen najbolje je pozvati stručnjaka kojem je rad s kompozitima blizak da napravi procjenu. Pojava „bjelkastih“ područja u strukturi stakloplastike dobra je napomena da je došlo do odlaganja vlakana. Mogućnost toplinskih oštećenja smole je još jedan nedostatak upotrebe kompozita. Iako "pretoplo" ovisi o

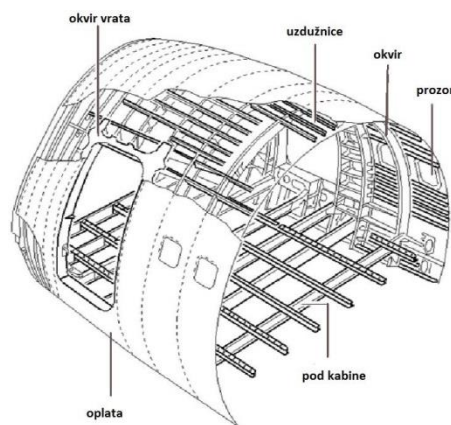
odabranom sustavu smole, mnoge epoksije počinju slabiti preko 60°C. Bijela boja na kompozitima često se koristi da se to pitanje minimizira. Zbog toga složeni zrakoplovi često imaju određene preporuke o dopuštenim bojama boja. Ako je zrakoplov prefarban, te se preporuke moraju pridržavati. Oštećenja topline mogu nastati i zbog požara te je zato bitno da i najmanji požar se brzo ugasi. Također kompoziti tijekom požara ispuštaju otrovne pare koje su jako štetne po ljudsko zdravlje. [23, 24]

## 4. ZRAKOPLOVNE KONSTRUKCIJE

Zrakoplov se kao cijelina susreće sa raznim opterećenjima i naporima tijekom leta, te je veoma bitno izabrati odgovarajući materijal koji može to izdržati. Stručnjaci pri izradi zrakoplova moraju dobro znati što koji materijal može podnijeti te koje su mu kvalitete. Svaka cijelina zrakoplova se nosi sa drugačijim opterećenjima te ne može isti materijal biti svugdje odgovarajući. Trup, krila, stajni trap, repne površine i pogonski sustav su najosnovniji elementi zrakoplovne konstrukcije pa će one biti detaljnije obrađene u nastavku.

### 4.1. Trup

Središnji sklop zrakoplova u kojem je smještena posada, putnici, razni uređaji i komande, na njega se vežu krila i repne površine. Mora zadovoljiti eksploatacijske (udobnost i izolaciju od vanjskih utjecaja) i aerodinamičke (što pravilniji oblik, bez oštrih rubova) uvjete. Trup se sastoji od: uzdužne nosive grede ili lončeron, okvira, uzdužnica, oplata i pregrade (slika 6.). Najpoznatije izvedbe trupa su: rešetkasti, kutijasti, ljuskasti i poluljuskasti.[1]



Slika 6. Dijelovi trupa [25]

#### 4.1.1. Vrste trupa

##### a) Rešetkasti

Konstrukcija rešetka je starije vrste konstrukcija i stvara se zavarivanjem cijevi zajedno kako bi tvorili pravokutni okvir. Nije toliko aerodinamičan pa se u današnje doba koristi na manjim zrakoplovima koji lete umjerenim brzinama. Cijevi lakih metala ili čelika se upotrebljavaju najčešće kao materijali.[26]

## b) Kutijasti

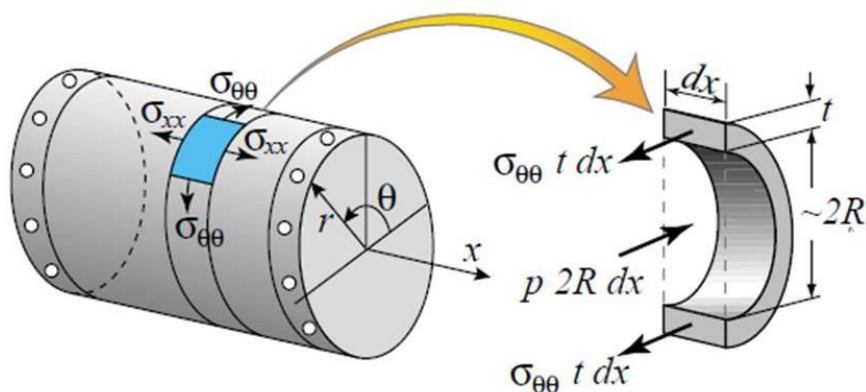
Sastavljen je od četiriju glavnih uzdužnica s pomoćnim poprečnim i dijagonalnim vezama koje služe kao osnova nosive strukture. Zbog ograničene oplata mora imati jak konstrukcijski nosivi kostur koji se sastoji uglavnom od nosivih uzdužnica i okvira. Uzdužnice primaju aksijalna opterećenja zbog savijanja a okviri služe za održavanje oblika.[27]

## c) Ljuskasti i poluljuskasti

Ljuskaste strukture su jednostavne i prilično čvrste oko rubova, ali unutarnji dijelovi ovih struktura ne podnose veliki vanjski pritisak jer sadrže samo okvir, oplatu i pregrade na oba kraja. Oplata koja je pričvršćena na okvir nosi 100% opterećenja te kod malih oštećenja, oplata se ne može više nositi s tolikim opterećenjem pa cijela konstrukcija može nastradati. Poluljuskaste strukture dizajnirane su na sličan način kao ljuskaste, ali s dodatnom potporom koja je dobivena uvođenjem uzdužnih greda i uzdužnica pa oplata nosi samo 50% posto opterećenja. Uzdužnice mogu biti nosivi dio trupa, odupiru se aksijalnom opterećenju, a okviri radijalnom.[1, 26]

### 4.1.2. Proračun opterećenja trupa (klasični i kompozitni zrakoplov)

Opterećenja se u trupu ne raspoređuju jednako. Kada je trup (izgledom podsjeća na cilindar) opterećen unutarnjim i vanjskim tlakovima stvaraju se aksijalno i radijalno opterećenje te je radijalno dva puta veće (slika 7.) Diferencijalni tlak, koji nastaje kao razlika unutarnjeg i vanjskog tlaka, služi kako bi se moglo disati u putničkoj kabini.[1]



Slika 7. Dijelovanje sila na trup zrakoplova uslijed djelovanja diferencijalnog tlaka [28]



a) radijalno opterećenje prema slici:

$$\sigma_{\theta} = \frac{F}{A} = \frac{\Delta p \times \text{površina na koju tlak djeluje}}{\text{površina na koju djeluje sila definirana brojnikom}} =$$

$$= \frac{\Delta p \times d \times D}{2 \times d \times t} = \frac{\Delta p \times D}{2 \times t}$$

- D - unutarnji promjer trupa koji je na slici označen sa 2R ( D = 2R)
- d - duljina trupa
- t - debljina oplata
- $\Delta p$  - diferencijalni tlak[1]

b) aksijalno opterećenje prema slici:

$$\sigma_x = \frac{F}{A} = \frac{\Delta p \times \text{površina na koju djeluje tlak}}{\text{površina na koju djeluje sila definirana brojnikom}} =$$

$$= \frac{\Delta p \times \frac{D^2 \pi}{4}}{t \times D \times \pi} = \frac{\Delta p \times D}{4 \times t}$$

- $\Delta p$  – diferencijalni tlak
- površina na koju djeluje tlak – površina kruga ( $r^2 \pi = \frac{D^2 \times \pi}{4}$ ), gdje je r radijus kruga
- površina na koju djeluje sila definirana brojnikom – umnožak debljine trupa i opsega kruga ( $2r\pi = D\pi$ ) [1]

c) omjer radijalnog i aksijalnog opterećenja

$$\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_x} = \frac{\frac{\Delta p \times D}{2 \times t}}{\frac{\Delta p \times D}{4 \times t}} = 2$$

- radijalno je dva puta veće od aksijalnog opterećenja [1]

Diferencijalni tlak igra bitnu ulogu u vrijednosti opterećenja jer s porastom istog proporcionalno raste i opterećenje na trup. Postupak kojim se održava tlak u trupu je prešurizacija, a provodi se kako bi se stvorilo sigurno i ugodno okruženje za putnike i posadu koji lete na velikim visinama. Ključni faktor prešurizacije je sposobnost trupa da izdrži opterećenja povezana s povećanjem tlaka unutar konstrukcije nasuprot tlaku okoline. Zrakoplovi prešuriziraju kabine na 8000 stopa jer konstrukcija trupa izgrađena većinom od aluminija bi se borila da izdrži veće razlike u tlakovima koje bi se stvarale ispod 8000 stopa. Materijal bi trpio jača opterećenja i zamarao se brže. Plastični kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima mijenjaju stvari i omogućuju promjene. *Boeing 787 Dreamliner* zbog njih prešurizira svoju kabinu na 6000 stopa jer kompoziti imaju veću toleranciju na opterećenja i teže se zamaraju. U nastavku će biti prikazano koliko je veće opterećenje na manjoj visini prešurizacije. Za primjer se koristi *Boeing 787 Dreamliner* čije potrebne karakteristike za ovu analizu su prikazane u tablici 2., a također su prikazane i različite vrijednosti tlakova za različite visine u ISA<sup>2</sup> uvjetima. (slika 8.).[29, 30]

**Tablica 2.** *Boeing 787* karakteristike[31, 32]

<i>Boeing 787</i> karakteristike	
Unutarnji promjer trupa (m)	5,49
Vanjski promjer trupa (m)	5,77
Debljina oplata (m)	0,002
Plafon leta (ft)	43,000
Visina krstarenja (ft)	35,000 – 43,000
Visina prešurizacije kabine (ft)	6,000

<sup>2</sup> ISA - svjetska standardna atmosfera, ISA je standard s kojim se može usporediti stvarna atmosfera u bilo kojem trenutku i vremenu.

visina (stope)	temp. (°C)	tlak			omjer tlaka $\delta = P/P_0$	gustoća $\sigma = \rho/\rho_0$	brzina zvuka (ft/s)	visina (metri)
		hPa	PSI	In.Hg				
40 000	-56.5	188	2.72	5.54	0.1851	0.2462	573	12 192
39 000	-56.5	197	2.58	5.81	0.1942	0.2583	573	11 887
38 000	-56.5	206	2.99	6.10	0.2038	0.2710	573	11 582
37 000	-56.5	217	3.14	6.40	0.2138	0.2844	573	11 278
36 000	-56.3	227	3.30	6.71	0.2243	0.2981	573	10 973
35 000	-54.3	238	3.46	7.04	0.2353	0.3099	576	10 668
34 000	-52.4	250	3.63	7.38	0.2467	0.3220	579	10 363
33 000	-50.4	262	3.80	7.74	0.2586	0.3345	581	10 058
32 000	-48.4	274	3.98	8.11	0.2709	0.3473	584	9 754
31 000	-46.4	287	4.17	8.49	0.2837	0.3605	586	9 449
30 000	-44.4	301	4.36	8.89	0.2970	0.3741	589	9 144
29 000	-42.5	315	4.57	9.30	0.3107	0.3881	591	8 839
28 000	-40.5	329	4.78	9.73	0.3250	0.4025	594	8 534
27 000	-38.5	344	4.99	10.17	0.3398	0.4173	597	8 230
26 000	-36.5	360	5.22	10.63	0.3552	0.4325	599	7 925
25 000	-34.5	376	5.45	11.10	0.3711	0.4481	602	7 620
24 000	-32.5	393	5.70	11.60	0.3876	0.4642	604	7 315
23 000	-30.6	410	5.95	12.11	0.4046	0.4806	607	7 010
22 000	-28.6	428	6.21	12.64	0.4223	0.4976	609	6 706
21 000	-26.6	446	6.47	13.18	0.4406	0.5150	611	6 401
20 000	-24.6	466	6.75	13.75	0.4595	0.5328	614	6 096
19 000	-22.6	485	7.04	14.34	0.4791	0.5511	616	5 791
18 000	-20.7	506	7.34	14.94	0.4994	0.5699	619	5 486
17 000	-18.7	527	7.65	15.57	0.5203	0.5892	621	5 182
16 000	-16.7	549	7.97	16.22	0.5420	0.6090	624	4 877
15 000	-14.7	572	8.29	16.89	0.5643	0.6292	626	4 572
14 000	-12.7	595	8.63	17.58	0.5875	0.6500	628	4 267
13 000	-10.8	619	8.99	18.29	0.6113	0.6713	631	3 962
12 000	- 8.8	644	9.35	19.03	0.6360	0.6932	633	3 658
11 000	- 6.8	670	9.72	19.79	0.6614	0.7156	636	3 353
10 000	- 4.8	697	10.10	20.58	0.6877	0.7385	638	3 048
9 000	- 2.8	724	10.51	21.39	0.7148	0.7620	640	2 743
8 000	- 0.8	753	10.92	22.22	0.7428	0.7860	643	2 438
7 000	+ 1.1	782	11.34	23.09	0.7716	0.8106	645	2 134
6 000	+ 3.1	812	11.78	23.98	0.8014	0.8359	647	1 829
5 000	+ 5.1	843	12.23	24.90	0.8320	0.8617	650	1 524
4 000	+ 7.1	875	12.69	25.84	0.8637	0.8881	652	1 219
3 000	+ 9.1	908	13.17	26.82	0.8962	0.9151	654	914
2 000	+ 11.0	942	13.67	27.82	0.9298	0.9428	656	610
1 000	+ 13.0	977	14.17	28.86	0.9644	0.9711	659	305
0	+ 15.0	1013	14.70	29.92	1.0000	1.0000	661	0
- 1 000	+ 17.0	1050	15.23	31.02	1.0366	1.0295	664	- 305

Slika 8. Raspodjela tlaka po visini u ISA uvjetima[33]

Proračun:

a) prešurizacija na 8000 stopa (klasični zrakoplovi)

- $p_{080} = 75,300 \text{ Pa}$
- $p_{390} = 19,700 \text{ Pa}$  (uzela se visina od 39000 stopa kao neki prosjek visine krstarenja)
- Diferencijalni tlak -  $\Delta p = p_{080} - p_{390} = 75,300 - 19,700 = 55,600 \text{ Pa}$
- D – unutarnji promjer trupa
- t – debljina oplata
- Radijalno opterećenje prema izvodu:

$$\sigma_{\theta,080} = \frac{\Delta p \times D}{2 \times t} = \frac{55,600 \times 5,49}{2 \times 0,002} = 76,311,000 \text{ Pa} = 76 \text{ MPa}$$

- Aksijalno opterećenje prema izvodu:

$$\sigma_{x,080} = \frac{\Delta p \times D}{4 \times t} = \frac{55,600 \times 5,49}{4 \times 0,002} = 38,155,500 \text{ Pa} = 38 \text{ MPa}$$

b) Na 6000 stopa (kompozitni zrakoplov)

- $p_{060} = 81,200 \text{ Pa}$
- $p_{390} = 19,700 \text{ Pa}$
- $\Delta p = p_{060} - p_{390} = 81,200 - 19,700 = 61,500 \text{ Pa}$
- $D$  – unutarnji promjer trupa
- $t$  – debljina oplata
  
- Radijalno opterećenje:

$$\sigma_{\theta,060} = \frac{\Delta p \times D}{2 \times t} = \frac{61,500 \times 5,49}{2 \times 0,002} = 84,408,750 \text{ Pa} = 84 \text{ MPa}$$

- Aksijalno opterećenje:

$$\sigma_{x,060} = \frac{\Delta p \times D}{4 \times t} = \frac{61,500 \times 5,49}{4 \times 0,002} = 42,204,375 \text{ Pa} = 42 \text{ MPa}$$

Rezultat je pokazao da je na 6000 stopa opterećenje veće za 8 MPa kod radijalnog i 4 MPa kod aksijalnog opterećenja te iako su opterećenja veća, kompozitni zrakoplov može se prešurizirati na toj visini jer je veća i čvrstoća materijala. Iako razlika djeluje mala, zapravo predstavlja veliku razliku jer treba uzeti u obzir da se prilikom svake prešurizacije stvara određeni pritisak tj. opterećenje na materijal i konstrukciju. Kod zrakoplova se to zove ciklus. Ciklus uključuje jedno polijetanje i slijetanje bez obzira na trajanje leta, što znači sat vremena ili deset sati je jedan ciklus sa jednom prešurizacijom. Što više ciklusa zrakoplov izvrši to će materijal sa svakim ciklusom trpiti opterećenja koja će ga, ovisno o materijalu, kroz neko vrijeme postepeno oslabiti usporedno sa početnim karakteristikama. Aluminijske konstrukcije bi se mogle isto prešurizirati na 6000 stopa, ali bi se onda morao smanjiti broj ciklusa i zrakoplov ne bi bio iskoristiv, zato se i dalje koristi 8000 stopa za takve konstrukcije. U budućnosti se razvijaju takve legure aluminija koje će moći izdržati prešurizaciju na 6000 stopa cijeli radni vijek zrakoplova. Konstrukcije gdje prevladavaju kompoziti imaju bolje karakteristike što se tiče zamora materijala, a ujedno i bolje trpe opterećenja. Kompoziti otprilike mogu izdržati duplo veće opterećenje od aluminjskih. Uvijek se teži u zrakoplovu ostvariti uvjete sličnima onima na zemlji, ali to znači i znatno veća opterećenja. Prešurizacija na 6000 stopa je već omogućila znatno bolje uvjete leta za putnike u odnosu na one na 8000 stopa (na 8000 stopa zasićenost kisika u krvi pada za 4%) jer na 6000 stopa zrak u kabini je gušći i ima veću zasićenost kisikom te su putnici odmorniji i bolje se osjećaju nakon dužih letova.[30, 34]

### 4.1.3. Prozor trupa

Kompoziti su omogućili još inovacija u konstruiranju zrakoplova. *Boeing B787 Dreamliner* je zbog njih mogao napraviti puno veće prozore u usporedbi sa prijašnjim klasičnim zrakoplovima gdje se u većini koristi aluminij (slika 9.). Za otprilike 80% su veći od onih u *Airbus-u A330/A340*. Moguće je zato što otprilike plastični kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima trpe puno veća opterećenja. Mogu izdržati i do 1300 MPa, dok aluminij može oko 500 MPa. Razlika je to od 800 MPa. Analizirajući te dvije vrijednosti dobije se sljedeći izraz.[35]

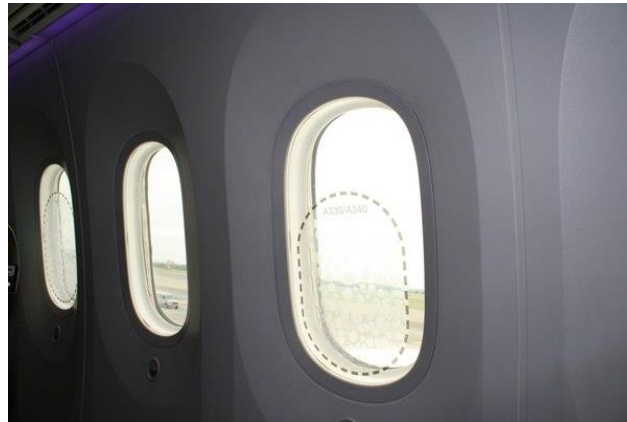
$$\frac{800}{500} = 1.6 = 160\%$$

Plastični kompozit ojačan ugljičnim vlaknima može izdržati i do 160% veća opterećenja usporedno s aluminijem. Uzevši u obzir prešurizaciju, može se saznati koliki je postotak opterećenja otišao na nju i to preko omjera diferencijalnih tlakova.

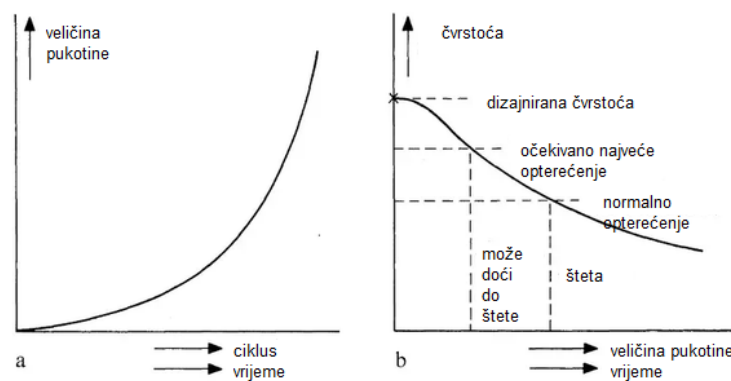
$$\frac{\Delta p_{060}}{\Delta p_{080}} - 1 = \frac{61,500}{55,600} - 1 = 1,106 - 1 = 0,106 = 10,6\%$$

Smanjenje visine prešurizacije je povećalo ukupno opterećenje za 10,6% što znači da je ostalo još puno prostora *Boeingu* da iskoristi mogućnost kompozita i njihovu veću čvrstoću. Upravo to su i napravili te su konstruirali veće prozore. Možda djeluje kao mala stvar, ali povećanje prozora u zrakoplovima to nije. Klasični aluminijski zrakoplovi uvijek su se držali malih prozora, a razlog je što konstrukcija trupa na mjestima gdje su prozori je najslabija jer su na tim mjestima spajane dvije cjeline. Prozor je spojen u konstrukciju trupa koja je automatski oslabljena na mjestima gdje se stvarao prostor za prozor. Što je prozor manje površine to i opterećenje koje se ravnomjerno širi zahvaća manju površinu, a kako se prilikom svake prešurizacije konstrukcija i materijali zbijaju pa potom šire, manji prozor je pouzdaniji i manja je šansa da dođe do pukotina u materijalu, a ujedno je to i razlog zašto prozori nisu ni kockasti već su rubovi zaobljeniji. Prozorska konstrukcija je puno čvršća na taj način i bolje se odupire opterećenju. Zbog puno ciklusa i zamora materijala treba uzeti u obzir da će uvijek doći do malih pukotina i to na mjestima gdje je konstrukcija najslabija, a koncentracija opterećenja najveća. O materijalu ovisi i koliko će brzo nastati pukotina zbog zamora te koliko će brzo rasti. Za klasične zrakoplove načinjene većinom od aluminijske, inženjeri su razvili teoriju koliko brzo pukotina raste uzevši u obzir broj ciklusa te koliko se smanjuje prvobitna čvrstoća materijala (slika 10). Ta teorija ne vrijedi za kompozitni zrakoplov jer iako će opterećenje na većem prozoru biti veće *Boeing* je mogao postaviti veće prozore jer cjelokupna konstrukcija je čvršća te se materijal sporije zamara. B787 ima najveće prozore usporedno s bilo kojim zrakoplovom

te omogućuju putnicima da bilo gdje u zrakoplovu, s bilo koje pozicije imaju odličan pogled na van tj. obzor.[35]



Slika 9. Prozor B787 usporedno s A330/A340[35]

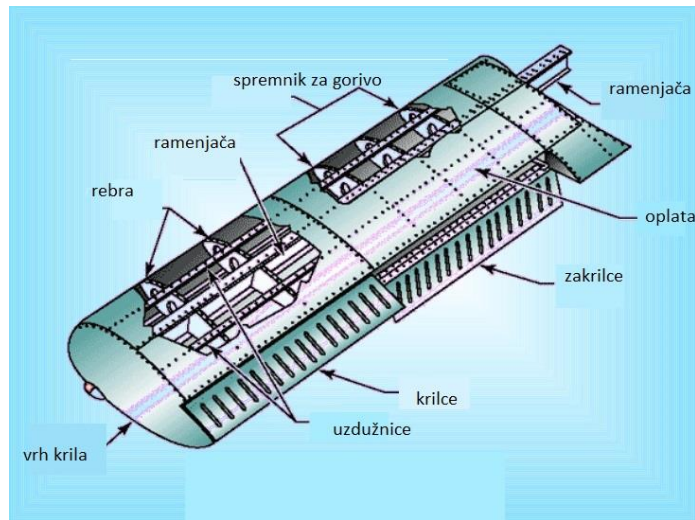


Slika 10. Učinak pukotine na čvrstoću materijala[35]

## 4.2. Krilo

S obzirom na funkciju krila, a to je stvaranje aerodinamičke sile uzgona, može se reći da je krilo glavni ili osnovni organ zrakoplova. Kako sila uzgona mora biti dovoljno velika da održi zrakoplov u zraku kad leti pri maksimalnoj dopuštenoj težini, očito je da je krilo podvrgnuto statičkim (gorivo u krilu te sama konstrukcija krila) i dinamičkim opterećenjima razne prirode. Uzgon pridonosi najvećem opterećenju krila (dinamičkom), i to na savijanje. Na krilu se nalaze i upravljačke površine poput krilaca i zakrilca.[27]

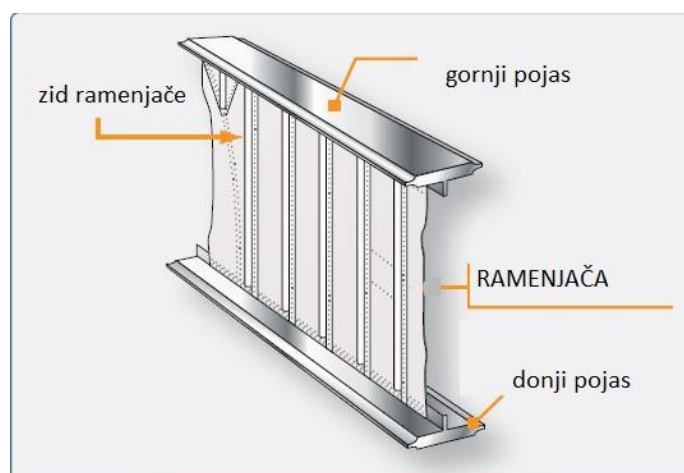
Konstruktivski gledano krilo se sastoji od: ramenjače, poprečna rebra, uzdužnice, oplata, napadni i izlazni dio krila, vrh krila i okova (slika 11.).[1]



**Slika 11.** Struktura krila [36]

a) Ramenjača

Glavne grede nosivog sustava krila, koje se odupiru savijanju, može biti jedna ili više njih. Sastoje se od gornjeg i donjeg pojasa koji se odupiru poprečnim silama te centralnog zida (slika 12.). Uloga pojasa jest razvijanje smicajuće sile da se odupre opterećenjima smicanja i torzije. Ona ima sekundarnu, ali vrlo značajnu ulogu da zajednički s oplatom „stabilizira” konstrukciju, te stoga može podnijeti velika tlačna opterećenja nastala od savijajućih i aksijalnih efekata.[1, 27]



**Slika 12.** Ramenjača [37]

#### b) Poprečna rebra

Rebro ima dvojaku ulogu: osigurava oblik presjeka krila, tj. aeroprofila, i prenosi transversalne aerodinamičke sile na ramenjaču. Uzduž krila rebra obično mijenjaju svoju tetivu te relativnu debljinu. Ona mogu biti raznih vrsta: normalno rebro, pomoćno (tj. djelomično), skraćeno (na mjestu krilaca), stanjeno na rubu krila i pojačano. Konstruktivno postoje pločasta, rešetkasta i kutijasta rebra, a prema primijenjenom materijalu drvena ili metalna, i to redovno od lakih slitina Al-Cu-Mg klase. Zbog relativno niskog opterećenja rebara ovdje primijenjeni materijal ima bitnu ulogu u konstruktivnoj koncepciji rebra.[1, 27]

#### c) Okovi

Okovi služe za vezu tj. priključak krila na trup, zatim za međusobnu vezu pojedinih krila, kao i za spajanje pojedinih dijelova krila međusobno, kao što je slučaj kod slobodno nosivih krila. Pogodnom konstruktivnom koncepcijom okova spoja krila može se mnogo pridonijeti olakšavanju i pojednostavljenju izradbe i većem osiguranju zamjenjivosti dijelova krila.[1, 27]

#### d) Oplata krila

Oplata krila zrakoplova ima zadatak da krilu osigura aerodinamičan oblik i ujedno prenese aerodinamičke sile na unutarnju strukturu krila. Te aerodinamičke sile prenose se preko oplata na rebra i uzdužnice kao djelovanje plohe ili membrane. Otpornost na sile smicanja i torzije preuzet će pojasevi ramenjača dok će aksijalna opterećenja i opterećenja na savijanje nositi kombinirana struktura oplata i uzdužnica.[1, 27]

#### e) Krilca

Osnovna konstruktivna koncepcija krilca ne razlikuje se mnogo od konstrukcije krila, osim što je znatno lakša i jednostavnija, zbog znatno nižega specifičnog opterećenja krilca. Tako se, u pravilu, primjenjuje samo jedna ramenjača. Sekcija između ramenjače i napadnog ruba zatvori se obično pomoću krute oplata čime se stvori otporna kutija protiv torzije.[1, 27]

### 4.3. Repne površine

Kod svih konvencionalnih zrakoplova kao jedan od osnovnih dijelova konstrukcije zrakoplova navode se stabilizirajuće i upravljačke površine, kojima je primarna funkcija



stabilizacija i upravljanje zrakoplovom u svih šest sloboda gibanja. Najčešće su stabilizirajuće površine ugrađene na repu zrakoplovne konstrukcije te ih se još naziva i „repne površine“. To je vertikalni stabilizator i kormilo smjera, horizontalni stabilizator i kormilo visine te krilca za poprečno stabiliziranje i upravljanje zrakoplovom (na krilu). Struktura repnih površina u načelu odgovara konstrukciji krila jer im je i aerodinamičko djelovanje analogno. Stabilizator odgovara konstrukciji krila, dok kormilo u svemu odgovara konstrukciji krilaca. Tako se stabilizator izvodi obično s dvjema ramenjačama jer je potrebna veća krutost i otpornost na torziju, koja djeluje na repu u raznim fazama leta. Uz to se stabilizator obično još i presvlači, najčešće nosivom oplatom. Tanji aeroprofili koji se presvlače platnom obično se vezuju žičanim zategama ili podupiru upornicama. Materijali koji su laki i imaju svojstvo velike otpornosti se koriste za ove površine.[1, 27]

#### 4.4. Stajni trap

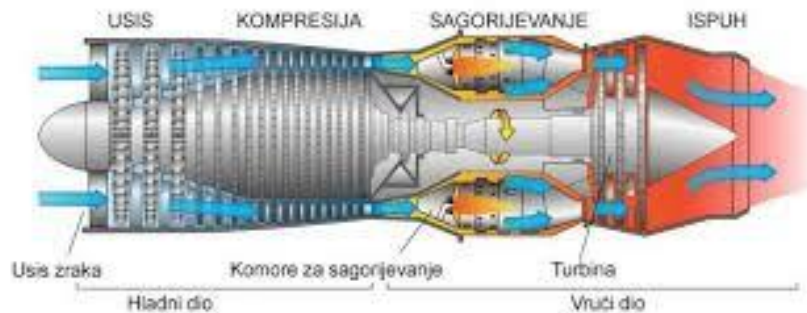
Stajni trap namijenjen je za polijetanje, slijetanje i manevriranje zrakoplova po tlu. Osim toga, njihova namjena je primanje kinetičke energije udara pri slijetanju i rulanju. Konstruiranje i pozicioniranje podvozja determinirano je jedinstvenim karakteristikama vezanim uz svaku zrakoplovnu konstrukciju, tj. geometrijom, težinom i zahtijevanom namjenom. Ovisno o podlozi po kojoj se zrakoplov kreće, odnosno s koje polijeće i na koju slijeće, imat će primjenljivo podvozje ili stajni trap, kotače, skije ili plovke za vodu. Osnovna im je funkcija omogućiti stabilno i upravljivo kretanje zrakoplova po zemlji i na vodi, a konstruktivne koncepcije mogu biti različite. Konstrukcijski gledano, stajni trap treba osigurati sigurnu uzdužnu i poprečnu stabilnost, treba osigurati zrakoplov od prevrtanja na nos, materijali trebaju biti otporni na toplinu jer apsorpcijom kinetičke energije, tijekom slijetanja, oslobađa se puno topline, trebaju se koristiti lakši materijali jer cjelokupna težina stajnog trapa treba biti mala te aerodinamički moraju stvarati minimalan mogući otpor. Najčešće se koristi nehrđajući čelik i legure titana, unatoč što su teški, jer stajni trap treba izdržati ogromne tone na sebi, a najčvršći su upravo ta dva. Ne mogu se ipak svugdje koristiti najlakši materijali poput kompozita. Pogodna i pregledna konstrukcija je pogodna za lako održavanje i popravke.[1, 27]

## 4.5. Pogonski sustav

Sustav koji je od velikog značenja jer stvara silu potiska koja je uz silu uzgona među glavnim razlozima zašto ogromni teški zrakoplovi mogu letjeti. Koriste se tri tipa uglavnom: klipno – elisni (propelerski) motori, turboprop motori te mlazni motori. Kod odabira materijala za pojedine komponente unutar samih motora treba znati da se stvaraju ogromne temperature tijekom rada što je među glavnim kriterijem za odabir materijala. Smanjenje mase motora smanjit će i cjelokupnu masu zrakoplova te kao i u ostalim cjelinama zrakoplova traži se što jeftinije mogući materijal, a da prilikom može izdržati opterećenja i biti lagan.

Kompozitni materijali i ovdje imaju veliku ulogu kad je u pitanju smanjenje mase. Proporcionalno s njihovim razvojem i otkrivanjem njihovih mogućnosti tako su se počeli implementirati i u same sustave motora.

Kako motor stvara ogromne temperature kompoziti ne mogu biti svugdje postavljeni. Najjači su mlazni motori te su oni ujedno i najteži pa je stručnjacima cilj stvoriti što lakši motor sa puno snage i dobrim performansama. Npr. raspon radnih temperatura kompozita polimernih matrica (PMC) učinkovito se ograničava na prednji "hladni" dio motora (slika 13.). Iako neke polimerne matrice mogu sigurno raditi na temperaturama većim od  $177^{\circ}\text{C}$ , većina težine motora još uvijek je koncentrirana u "vrućoj zoni" motora, gdje segmenti turbine mogu doseći radne temperature veće od  $1315^{\circ}\text{C}$  (što nadilazi mogućnosti čak i najegzotičnijih polimera). Visoke cijene i poteškoće u proizvodnji povezane s visokotemperaturnim metalnim legurama za ove primjene predstavljaju veliki cilj za buduće napore u smanjenju težine na temelju keramike i kompozita sa keramičkom matricom. Mogućnosti zamjene metala kompozitima s keramičkim matricama (CMC) mogu biti veće od onih koje već zahtijevaju kompoziti polimernih matrica. Kompoziti na bazi keramike koji sadrže i keramička vlakna i matricu nude potencijalnu primjenu na temperaturama koje i najbolji metali ne mogu izdržati. Ako se koristi CMC, onda je to za izradu dijelova turbine, mlaznica i ostalih „vrućih zona“ motora. [38, 39]



**Slika 13.** Dijelovi mlaznog motora [40]

Najveći pomak u implementaciji kompozita napravila je *GE Aviation*<sup>3</sup> tvrtka 1995. godine. Tehnički je toliko teško stvoriti zahtijevne komponente od kompozita da je do danas jedina tvrtka s kompozitnim lopaticama. Materijal im je omogućio da inženjeri dizajniraju lopatice koje rezultiraju lakšim i učinkovitijim motorima, omogućavajući zrakoplovnim kompanijama uštedu goriva izbacivanjem dragocjenih kilograma. Napravljene su od kompozita s ugljičnim vlaknima, te omogućile GE-ovim inženjerima da dizajniraju GE90 (slika 14.) koji je još uvijek najveći i najsnažniji mlazni motor na svijetu te jedini sa kompozitnim lopaticama. Svaki GE90 motor je imao 22 lopatice od ugljičnih vlakana. To je ujedno i najprofitabilniji stroj *GE Aviation*. Ostali proizvođači i dalje koriste titan i čelik pri proizvodnji jer ne žele riskirati sa kompozitima, a koliki rizik predstavljaju kompoziti, jer su relativno novi materijali, govori i činjenica da ni svi u *GE Aviation* nisu bili sretni s idejom lopatica od kompozita. Razlog zbog kojeg su se brinuli bio je najveća mana kompozita, nemogućnost uočavanja vizualne štete materijala. Tipične lopatice od titana apsorbiraju energiju i ispuče se kada naiđu na prepreke poput ptice. Kompoziti se mogu raspasti iznutra i puknuti, a da se izvana ništa ne vidi. Izvedene su stotine intenzivnih testova simulirajući ptičje udare, kišu, snijeg, oluju i tuču. Rezultati su bili više nego zadovoljavajući i kompoziti su se pokazili veoma izdržljivi i otporni na razna opterećenja i napore.[41]

<sup>3</sup> *GE Aviation* je među vodećim dobavljačima motora za zrakoplove i nudi motore za većinu komercijalnih zrakoplova te je dio *General Electric* koja je jedna od najvećih svjetskih korporacija



**Slika 14.** GE90 mlazni motor [42]

Klipno - elisni motori za razliku od mlaznih koriste kompozite preko 70 godina i to najviše za izradu propelera (slika 15.). Iako napredni kompozitni propeleri rastu u popularnosti, mnogi se vlasnici zrakoplova i dalje pitaju o prednostima propelera načinjenog od kompozita s ugljičnim vlaknima u usporedbi sa drvom ili aluminijem. Kao i svugdje glavna prednost je što smanjuju ukupnu masu zrakoplova poboljšavajući potrošnju goriva čineći ju efikasnijom te i same performanse zrakoplova jer je omogućeno stvaranje aerodinamičnijeg propelera. Smanjuju i vibracije, a s time i buku unutar zrakoplova te putnici mogu uživati u ugodnijoj vožnji. Materijal može dugo potrajati pa je i održavanje lakše, a i veoma je otporan što smanjuje moguće buduće popravke.[43]

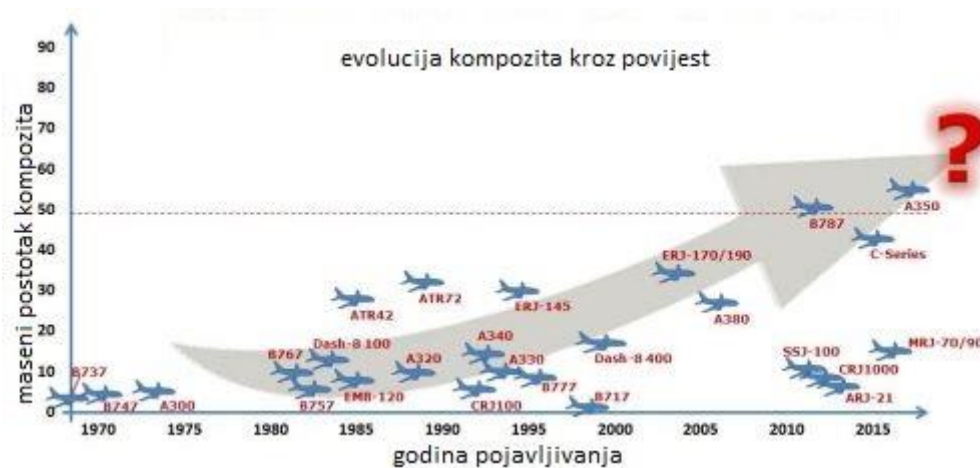


**Slika 15.** Kompozitni propeler [44]

## 5. KOMPOZITNI MATERIJALI U ZRAKOPLOVIMA

Američka tvrtka *Boeing* i francuska tvrtka *Airbus* dva su najveća rivala što se tiče proizvodnje zrakoplova. Pojava novijih materijala kroz prošlost ih je gurala da ih počnu implementirati u svoje zrakoplove te da stvore nešto novo, nešto bolje. Pojavom čelika, aluminija, titana ili pak kompozitnih materijala lakše je izraditi lagan i brz zrakoplov, što se u prošlosti činilo, ne baš lakim zadatkom dok je drvo bilo među glavnim materijalima za izradbu konstrukcije. Dva moderna zrakoplova koja su gurnule granice kad su u pitanju kompozitni materijali su *Boeingov B787 Dreamliner* koji je prvi napravio zrakoplov načinjen 50% od kompozita, a odgovor je došao s druge strane jer je francuska tvrtka predstavila svoj *Airbus A350*.

Oba modela B787 i A350 izrađena su u pravilu od polimera ojačanih ugljičnim vlaknima. Što se tiče mase, kod B787 ugljična vlakana čine oko 50% ukupne mase, a kod A350 otprilike 53% te su znatno iznad ostalih što se tiče implementacije kompozitnih materijala (slika 16.). [45]



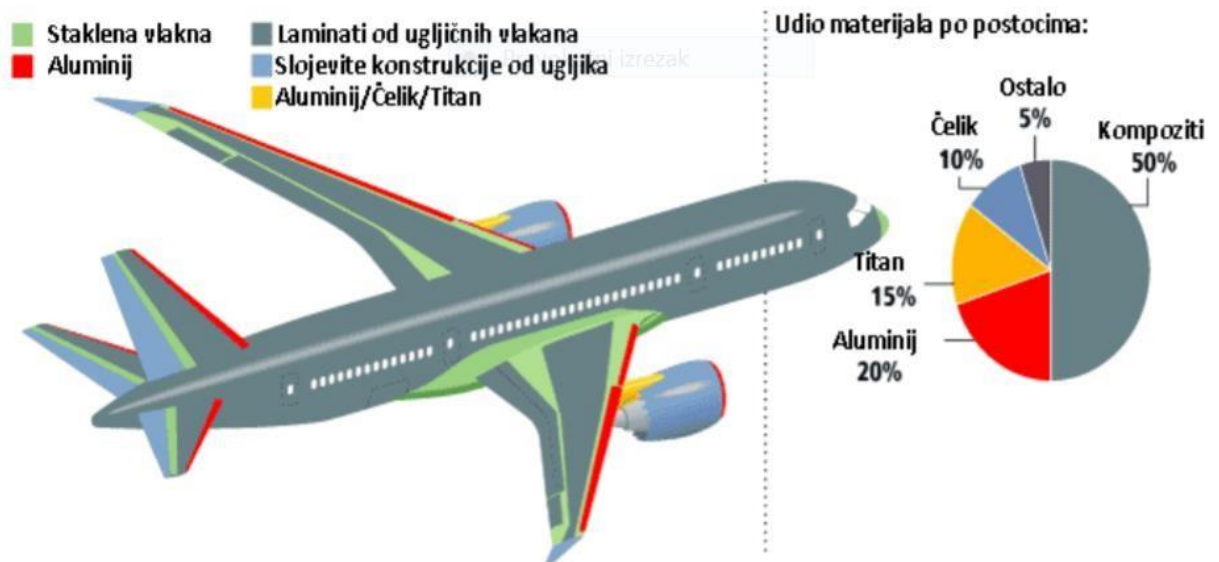
Slika 16. Postotak kompozita u zrakoplovima kroz povijest [45]

## 5.1. Boeing B787 Dreamliner

Model 787 posve je novi dizajn bez zaostavljenih ograničenja i postiže mnoge prve korake u komercijalnom zrakoplovstvu. Postoje tri varijante ovog zrakoplova: *Boeing B787-8*, *Boeing B787-9*, *Boeing B787-10*. Najbolje koristi dostupne nove tehnologije te materijali, aerodinamika, sustavi i motori odabrani su i dizajnirani s cjelokupnim integriranim dizajnom na čelu. Izbor dizajna nikada ne optimizira jedno područje na štetu ukupnih performansi, ekonomičnosti, troškova održavanja ili dostupnosti zrakoplova. Neke od prednosti ovog zrakoplova su da troši 20% manje goriva od prijašnjih, potrebno je 30% manje vremena da ga se održava, smanjene su emisije ispušnih plinova kao i cjelokupna buka zrakoplova te manja visina prešurizacije, a veći prozori omogućuju ugodnije putovanje i zadovoljnije putnike. Pouzdaniji je i lakše ga je popravljati i jako je ekonomičan. Omogućuje zrakoplovnim kompanijama da pruže duže direktne letove, ima više teretnog prostora te može letjeti i pri većim brzinama.[46]

Materijali odabrani za B787 pružaju najniže operativne troškove tijekom životnog vijeka zrakoplova. Odabir optimalnih materijala znači analizu svakog područja zračnog okvira kako bi se utvrdilo najbolje rješenje na temelju radnog okruženja i opterećenja iskušanih tijekom života zrakoplova. Glavna revolucionarna tehnologija materijala na modelu B787 je povećana upotreba kompozita u odnosu na druge materijale. Većina primarne konstrukcije izrađena je od kompozitnih materijala, ponajviše trup. Kompozitni materijali imaju mnogo prednosti: omogućuju lakšu, jednostavniju strukturu, što povećava učinkovitost zrakoplova, smanjuju potrošnju goriva i smanjuju održavanje i troškove na temelju težine. Ne umaraju se i ne korodiraju, što smanjuje planirano održavanje i povećava produktivno vrijeme. Kompoziti bolje odolijevaju udarcima i dizajnirani su za jednostavan vizualni pregled.[46]

Zrakoplov *Boeing B787* po udjelu mase ima sadržaj materijala 50% kompoziti, 20% aluminij, 15% titan, 10% čelik i 5% ostalo (slika 17.) Aluminij se koristi za prednje rubove krila i repa, titanijum se koristi uglavnom na motorima, a čelik se koristi u raznim područjima. Svaki zrakoplov *Boeing B787* sadrži oko 32 tone kompozita izrađenih od 23 tone ugljičnih vlakana. Kompoziti se koriste na trupu, krilima, repu, vratima i unutrašnjosti.[46]



Slika 17. Materijali u modelu B787 [47]

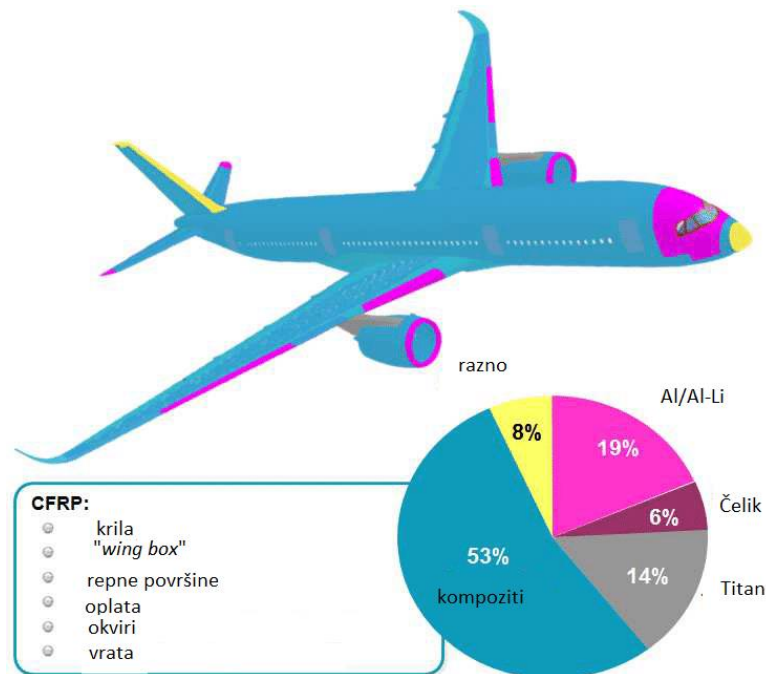
## 5.2. Airbus A350

A350 XWB (*extra wide body*) je član obitelji *Airbus*-a široke karoserije. A350 XWB dugog doseg a kombinira najnovija dostignuća u konstrukciji trupa i krila koristeći inteligentni zračni okvir i dizajn polimernih krila ojačanih ugljičnim vlaknima. Nudi smanjenje potrošnje goriva za 25% u usporedbi s trenutačnim konkurentima na duge staze. *Airbus* A350 XWB sastoji se od tri modela: A350-800, A350-900 i A350-1000 te svaki ima nevjerojatne domete. Proizvodnja, montaža i održavanje optimiziraju se korištenjem standardnih dijelova, pogonskih sustava, materijala zrakoplova čime se osigurava optimalna radna učinkovitost kroz životni vijek. Široka paleta naprednih materijala korištenih u A350 XWB doprinosi stvarnom poboljšanju dizajna u odnosu na prethodne *Airbus*-ove modele.[48]

Kompozitni materijali nazvani su oblikom budućnosti zrakoplovstva. Njihova dobitna kombinacija je velika snaga, mala težina i izdržljivost. *Airbus* je više od 30 godina bio za korištenje takvih materijala u svojim komercijalnim zrakoplovima, od malog udijela u vertikalnom stabilizatoru zrakoplova A310 do današnjeg A350 XWB na kojem je više od pola strukture zrakoplova sastavljeno od kompozita.[49]

Preko pola (53%) trupa zrakoplova sastoji se od kompozitnih materijala kako bi se izbjegla potreba za inspekcijama u vezi s umorom koje su potrebne za uobičajene aluminijske zrakoplove (slika 18.). To je dijelom i zbog činjenice da kompozitni materijali imaju veću otpornost na koroziju. Okvir A350 je oko 19% aluminij. Osim toga, nos aviona izrađen je od

aluminija umjesto jednodijelne strukture od karbonskih vlakana, jer je aluminij isplativiji. Titan je zastupljen u okviru oko 14% jer je lagan i čvrst, lako ga je za reciklirati te ima dobar otpor na koroziju. Titan u kombinaciji s kompozitima smanjuje potrebu za korozijsko tretiranje zrakoplova za 60%.[48]



**Slika 18.** Usporedba materijala u modelu A350 [50]

A350 XWB je prvi *Airbus* koji ima svoje konstrukcije krila i trup izrađene od plastika ojačanih ugljičnim vlaknima. Korištenje plastike ojačane ugljičnim vlaknima koja su učvršćena na plastičnoj smoli nudi bolji omjer čvrstoće i težine od metala i manje je osjetljiv na umor i koroziju. Ukratko, lakši je od aluminija, jači od željeza te prikladan za održavanje i rezultira manjim sagorijevanjem goriva smanjujući težinu i omogućava napredni dizajn krila.[48]

Iako su u početku skuplji za izradu od tradicionalnih metalnih dijelova, CFRP komponente mogu uštedjeti novac operaterima zrakoplova na budućim troškovima održavanja. Na primjer, za A350 XWB potrebno je 50% manje zadataka održavanja konstrukcije, a prag za provjeru konstrukcije je 12 godina u usporedbi s osam za A380.[48, 49]

*Airbus* je odlučio napraviti kokpit A350 od aluminija (slika 19.), dok njegov konkurent u modelu B787 koristi kokpit od ugljičnih vlakana, ali zbog činjenice da se kod ugljičnih vlakana teško vide unutarnja oštećenja (koji mogu poticati iz udara u ptice), struktura kokpita ojačana je unutarnjim titanom.[51]





**Slika 19.** Kokpit od aluminija kod modela A350 [51]

## 6. PREGLED I POPRAVCI KOMPOZITNIH MATERIJALA

Posljednjih godina izrađeni su kompoziti polimernih matrica u kombinaciji sa ojačalima od staklenih ili ugljičnih vlakna te postali jedan od glavnih materijala za izbor kod mnogih zrakoplovnih strukturnih komponenata. Taj prijelaz sa metalnih materijala prvenstveno je posljedica prilagodljivost kompozitnih dijelova na zrakoplovstvo. Unatoč mnogim prednostima, osjetljivost na skrivena i jedva vidljiva oštećenja od udaraca kod kompozita je još uvijek glavna briga. Ta oštećenja mogu nastati tijekom proizvodnje, održavanja, servisa te se skrivaju ispod površine, gdje su vizualni pregledi ograničeni. Ako se štete ne uoče na vrijeme može doći do katastrofalnog kvara strukture. Složene konstrukcije se moraju redovitije pregledavati kako bi se kvar spriječio. U ovom segmentu prednost imaju ostali materijali jer kod s njih se može lakše uočiti oštećenje.

### 6.1. Metode *Non-destructive testing* (NDT)

Osnovne vrste NDT metoda uključuju kontakt i ne-kontakt metode i obje imaju svoje specifičnosti za ispitivanje i ocjenjivanje kompozita. Većina NDT tehnika zahtijeva dobar kontakt između senzora i testirane kompozitne površine za dobivanje pouzdanih podataka. Najpoznatije metode su: [52]

#### a) Vizualno ispitivanje

Trebalo bi biti najosnovnija metoda jer štedi na vremenu i novcu smanjujući količinu drugih ispitivanja. Najvažnija prednost je brzina postupka jer ne treba nikakvu specijalnu opremu što je ujedno je razlog druge bitne prednosti, a to je da je pristupačan cijenovno.

#### b) Ultrazvučno ispitivanje

Sustav ocjenjivanja sastoji se od kruga odašiljača i prijamnika, alata pretvornika i uređaja za prikaz. Bazirano na informaciji koja se prenosi signalom, mjesto pucanja, veličina greške, njezina orijentacija i druge karakteristike se mogu otkriti. Prednosti ultrazvučnog ispitivanja uključuju brzinu skeniranja, dobru razlučivost te mogućnosti otkrivanja nedostataka i sposobnost korištenja na terenu. Nedostaci su da je potrebna vještina preciznog skeniranja i potreban testni uzorak kako bi se osiguralo točno ispitivanje.

c) Termografsko ispitivanje

Toplinska vodljivost materijala može se promijeniti u nazočnosti deformacije unutar materijala. Ovaj tip ispitivanja se koristi na tankim materijalima zato što kada se deformacija pomakne dublje ispod površine određenog dijela proizvodi manje topline i onda se čini da je deformacija bliže površini. Prednost je što se može prekriti veća površina odjednom, ali potrebni su osjetljivi i skupi instrumenti te iskusni inspektori koji znaju rukovati instrumentima što predstavlja veliku manu ovog načina testiranja.

d) Radiografsko ispitivanje

Najčešći tip ispitivanja jer kod kompozitnih materijala dolazi najviše do raslojavanja tj. lome se u slojeve što rezultira stvaranje zračnih đepova između slojeva. Raslojavanje se može otkriti samo ovim ispitivanjem i to ako smjer raslojavanja nije okomit na x-zrake.

e) Elektromagnetno ispitivanje

Koristi se magnetizam i električna energija za otkrivanje i procjenu lomova, kvarova, korozije ili drugih uvjeta materijala. Ispitivanjem se inducira električna struja, magnetska polja ili oboje unutar ispitnog objekta i promatra te čeka na elektromagnetski odgovor.

f) Akustično ispitivanje

Učinkovita je metoda analize nesavršenosti materijala. Mehaničke vibracije nastaju zbog nedostataka u materijalu kao što su mikropukotine u matrici, odvajanjem matrice od vlakana, raslojavanja te loma vlakana. Valovi stresa koji se pojavljuju zbog ovih vrsta oštećenja koncentrično se šire od svog ishodišta i otkrivaju se nizom vrlo osjetljivih instrumenata.

g) Akustično – ultrazvučna

Kombinacija je akustičnog i ultrazvučnog ispitivanja koja se koristi specifično za otkrivanje unutarnje nesavršenosti i nehomogenosti kompozita. Spojena ova dva ispitivanja imaju zajedno dobar potencijal za daljnji razvoj zbog optimalne ekonomičnosti, fleksibilnosti i osjetljivosti. Korisna metoda jer je moguće detektirati i procijeniti ne tako još kritične mane materijala.

#### h) *Shearography* ispitivanje (lasersko optička metoda)

Kompoziti često dožive deformaciju zbog velikih napora te se kritičnost iste može lako otkriti stupnjem koncentracije naprezanja oko nje. Metoda nije toliko osjetljiva na buku što joj daje prednost s obzirom na ostale metode jer je lakše s njom rukovati te manje iskusni ljudi ju mogu koristiti bez nekog posebnog školovanja. Osim raslojavanja unutar kompozita ova metoda teško može otkriti neku drugu deformaciju stoga se često kombinira sa drugim metodama.

## 6.2. *Structural Health Monitoring (SHM)*

Većina modernih SHM sustava oslanja se na filozofiju tolerancije na oštećenja, što znači da struktura može izdržati određenu štetu bez da oslabi. Iako postoje brojni alati (NDT) za periodične preglede, od kojih su mnogi prilično napredni i točni, NDT tehnike zahtijevaju mnogo vremena, obučene inspektore, a mogu zahtijevati i demontažu određenih komponenti. Taj pristup, kada je komercijalni zrakoplov uzemljen, znači gubitak prihoda. SHM nudi efikasnije i isplativije načine utvrđivanja štete, uz minimalno vrijeme zastoja i demontaže zrakoplova, također radi ruku pod ruku s optimiziranim dizajnom zrakoplova. Osnovna ideja je izgraditi sustav sličan ljudskom živčanom sustavu, s mrežom senzora postavljenih u kritična područja gdje strukturni integritet mora biti održavan. Matematički algoritmi temeljeni na "neuronskoj mreži" tada se mogu obučiti za prepoznavanje obrazaca električnih signala koji predstavljaju oštećenja, poput naprezanja vlakana ili puknuća i pukotina matrice. U najširem smislu, SHM obuhvaća distribuiranu mrežu senzora koji su raspoređeni kao sastavni dijelovi strukture i sposobni su da prikupljaju i šalju informacije ispitivaču ili elektroničkom nadzornom uređaju.[53, 54]

Postoje tri pristupa za SHM:

- 1) samo *in-situ*<sup>4</sup> senzori, koji su stalno ugrađeni u strukturu, a koji zahtijevaju periodično nadziranje sa zasebnom jedinicom dok konstrukcija ne radi
- 2) senzori s mogućnošću *in-situ* prikupljanja podataka (koji omogućuju evidentiranje podataka tijekom rada) koji i dalje zahtijevaju periodična preuzimanja podataka izvan službe

---

<sup>4</sup> *in-situ* - svako opažanje koje instrument vrši u izravnom dodiru sa medijem naziva se "*in situ*" opažanjem, a suprotno mu je "*remote*" opažanje koje nije u izravnom kontaktu s medijem

3) senzori s prijenosom podataka u stvarnom vremenu na udaljeno mjesto, koji omogućuju strukturni nadzor u stvarnom vremenu tijekom rada putem bežičnog telemetrijskog sustava.[54]

SHM metode uključuju razne senzorne tehnologije od kojih su neke slične NDT metodama poput akustičnog ispitivanja i akustično – ultrazvučne metode, ali ono po čemu se SHM razlikuje, je to što neke metode uključuju ugradnju senzora unutar kompozita.[54]

a) *Fibre Bragg* senzori za difrakcijsku rešetku

Vlaknasti optički kablovi ugrađeni u strukturu laserski su označeni uzorcima optičkih smetnji. Bilo koji lokalni pritisak uzrokuje malu promjenu valne duljine prijenosa svjetla senzora.

b) Mikrovalni senzori

Mali mikrovalni senzori ugrađeni u strukturu šalju i primaju signale koji upućuju na ulazak vlage. Metoda je dobra za nadgledanje složenih sendvič struktura.

Ove i druge metode SHM tehnologije sada u razvoju nude u budućnosti izgleda da će se smanjiti ili ukloniti zakazane inspekcije zrakoplova.

### 6.3. Popravak kompozitnih materijala

Neke su štete na kompozitima očite i lako se procjenjuju, ali u nekim slučajevima mogu se prvo pojaviti prilično mala oštećenja, iako je prava šteta mnogo veća. Oštećenja na vlaknima se mogu pojaviti kao mala udubljenje na ojačanoj kompozitnoj površini, ali ispod nje šteta može biti puno veća. Odluka o popravku ili otpadu određuje se uzimajući u obzir opseg popravka koji je potreban za zamijenu izvorne strukturne izvedbe kompozita. Ostala razmatranja su troškovi popravka, položaj i dostupnost oštećenja te dostupnost odgovarajućih popravnih materijala. Kada kompozitna konstrukcija sadrži oštećenja, postoje tri razine popravka, a to su: kozmetička, privremena i strukturna. Kada se materijal ošteti samo površinski i ispitivanjem je pokazano da je struktura netaknuta primjenjuje se samo vizualni popravak. Privremeni popravak se koristi u slučaju kada dođe do blagog oštećenja malog dijela strukture, ali nije kritično po cijelu strukturu. Ako je oštećenje oslabilo strukturu vlakana, potrebna je zamjena istih te se ta razina popravka naziva strukturna. Glavna svrha strukturnog popravka je u potpunosti podržati opterećenja i prenijeti naprezanja po cijelom popravljenom području. Postoje tri osnovna tipa: *patch repair*, *taper sanded repair*, *step sanded repair*. Kod ovih popravaka, pravilna obrada površine je presudna za uspješan rezultat. Navedeni popravci mogu oduzeti puno vremena i potrebno je iskustvo i puno vještine kako bi se to pravilno napravilo.[55]

## 7. ZAKLJUČAK

Zrakoplov je složena konstrukcija i potrebno je puno rada na njemu da se dovede u završno stanje spremno za let. Korisnici koji se koriste zrakoplovnim uslugama malo znaju o tome koliko je truda i raznih testova napravljeno na istom da bi bio pušten u funkciju. Tijekom svog rada, zrakoplov iskusi razna opterećenja i ako se s njima ne može nositi može doći do nesreće. Rade se razne provjere materijala, simuliraju se uvjeti kako bi se vidjelo koji materijal najbolje odgovara za određeni element konstrukcije. Za vrlo opterećene dijelove bitno je da je materijal čvrst i otporan, dok za manje opterećene dijelove mogu se koristiti i lakši materijali te se tako pridonijeti ukupnoj masi zrakoplova. Cilj je zrakoplov napraviti tako da bude aerodanamičniji i lakši, a kompozitni materijali tu imaju veliku ulogu jer svojom pojavom brzo su se našli i u zrakoplovnim konstrukcijama. U početku su se u tragovima mogli zateći u konstrukcijama zrakoplova, ali danas su u nekim zrakoplovima zastupljeni i preko 50%. Uz kompozite koji sve više dobivaju na pažnji, još uvijek se koriste i neki tradicionalni materijali jer kompoziti ipak ne mogu baš sve zamijeniti. Čelik, titan, aluminij i njihove legure i dalje su u velikoj primjeni zbog svojih dobrih svojstava, dok je drvo potpuno zamijenjeno novim materijalima. Najviše se primjenjuje aluminij litijeva legura te predstavlja konkurenciju kompozitima. Sve u svemu, kompozitni materijali su otporni na koroziju, lakši, dugog vijeka trajanja, no imaju manju otpornost na sudare, zapaljiviji su i ne mogu se vizualno otkriti pukotine. Zaključno tome, zrakoplovi se izrađuju od više materijala te ovisno o elementu konstrukcije bira se najbolji materijal za svaki dio.

## POPIS LITERATURE

- [1] Marušić Ž. Zrakoplovna prijevozna sredstva; Autorizirana predavanja; Zagreb: Fakultet prometnih znanosti; 2018.
- [2] <http://www.scielo.mec.pt/pdf/ctm/v20n3-4/v20n3-4a11.pdf> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [3] <https://www.experimentalaircraft.info/articles/aircraft-building-8.php> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [4] <https://aluminiuminsider.com/aluminium-lithium-alloys-fight-back/> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [5] Štrumberger N. Tehnologija materijala 1; Zagreb: Fakultet prometnih znanosti; 2003; str. 214.- 220.
- [6] <https://www.william-rowland.com/blog/the-use-of-metft-manufacture/> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [7] <https://www.google.com/search?q=steel+in+landing+gear> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [8] <http://howthingsfly.si.edu/structures-materials/materials> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [9] Milutinović S. Konstrukcija aviona; Beograd; Sveučilište u Beogradu; 1970.
- [10] <http://www.king-titanium.com/technical-article/aviation-sr71.html> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [11] <https://www.science.org.au/curious/technology-future/composite-materials> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [12] [http://mohan.mse.gatech.edu/Research/stereocomplex\\_fiber/fig2.JPG](http://mohan.mse.gatech.edu/Research/stereocomplex_fiber/fig2.JPG) (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [13] <https://www.compositesworld.com/articles/the-matrix> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [14] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9814> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [15] Gojko Marić: Materijali I; Fakultet strojarstva i brodogradnje
- [16] <http://compositeslab.com/composite-materials/reinforcements/> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [17] <http://www.essentialchemicalindustry.org/materials-and-applications/composites.html> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [18] [http://www.aerodamagelab.fsb.hr/books/materijali\\_mehanika\\_kompozita.pdf](http://www.aerodamagelab.fsb.hr/books/materijali_mehanika_kompozita.pdf) (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [19] <https://www2.virginia.edu/bohr/mse209/chapter17.htm> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [20] <https://www.quartus.com/resources/composites-101/> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [21] Biščan M. Završni rad; Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011
- [22] <https://www.premix.com/why-composites/adv-composites.php> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [23] <http://www.flightlearnings.com/2011/03/23/composite-construction-part-four-disadvantages-of-composites/> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [24] <https://www.flight-mechanic.com/composite-materials-part-one/> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [25] <https://www.google.com/search?biw=1536&bih=699&tbm=isch&sa=1&> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [26] <https://www.thebalancecareers.com/aircraft-structure-and-components-282576#aircraft-frames> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [27] <https://static.fpz.hr/files/332cb65c2f66924e273fe8ad79395d69.pdf> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [28] <https://www.google.com/search?biw=1536&bih=699&tbm=isch&sa=1&> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [29] <https://www.aircraftsystemstech.com/2017/05/aircraft-pressurization-issues.html> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [30] <https://www.businessinsider.com/boeing-787-dreamliner-777x-cabin-pressure-jetlag-2016-9> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [31] <http://www.modernairliners.com/boeing-787-dreamliner/boeing-787-dreamliner-specs/> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [32] [https://www.academia.edu/11843565/FATIGUE\\_ANALYSIS\\_OF\\_COMPOSITE\\_FUSELAGE](https://www.academia.edu/11843565/FATIGUE_ANALYSIS_OF_COMPOSITE_FUSELAGE) (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [33] <https://aviation.stackexchange.com/questions/36882/what-are-isa-10-isa-15-and-isa-30> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [34] <https://www.quora.com/How-are-flight-hours-flight-cycle-airframe-hours-engine-hours-engine-cycle-and-landing-cycle-calculated-1> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [35] <https://www.quora.com/Why-are-passengers%E2%80%99-windows-in-airplanes-so-much-smaller-than-the-cockpit%E2%80%99s> (pristupljeno: kolovoz 2019.)



- [36] <https://pritamashutosh.wordpress.com/2012/10/04/typical-aircraft-wing-and-fuselage-structure/> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [37] <http://www.flight-mechanic.com/wings-part-one/> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [38] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=918> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [39] <https://www.compositesworld.com/articles/ceramic-matrix-composites-hot-engine-solution> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [40] [http://repositorij.fsb.hr/5158/1/Milojevic\\_2016\\_zavrzni\\_preddiplomski.pdf](http://repositorij.fsb.hr/5158/1/Milojevic_2016_zavrzni_preddiplomski.pdf) (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [41] <https://www.ge.com/reports/the-art-of-engineering-the-worlds-largest-jet-engine-shows-off-composite-curves/> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [42] [https://en.wikipedia.org/wiki/General\\_Electric\\_GE90](https://en.wikipedia.org/wiki/General_Electric_GE90) (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [43] <http://hartzellprop.com/4-reasons-to-switch-to-a-composite-aircraft-propeller/> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [44] <https://www.pinterest.com/pin/370561875585336498/> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [45] <https://www.google.com/search?q=787+vs+a350+composites+percent> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [46] <https://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#/superior-tech> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [47] <https://www.appropedia.org/images/d/d7/Composites01.jpg> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [48] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7858> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [49] <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2017/08/composites--airbus-continues-to-shape-the-future.html> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [50] [https://www.researchgate.net/figure/Materials-used-in-a-modern-aircraft-the-Airbus-A350-XWB-5\\_fig6\\_318923824](https://www.researchgate.net/figure/Materials-used-in-a-modern-aircraft-the-Airbus-A350-XWB-5_fig6_318923824) (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [51] <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-Airbus-A350-and-Boeing-787-in-terms-of-composite-materials> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [52] <https://core.ac.uk/download/pdf/82433044.pdf> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [53] <https://www.compositesworld.com/articles/structural-health-monitoring-composites-get-smart> (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [54] [https://www.researchgate.net/publication/258217596\\_Structural\\_Health\\_Monitoring\\_SHM\\_of\\_Composite\\_Aerospace\\_Structures\\_Using\\_Lamb\\_Waves](https://www.researchgate.net/publication/258217596_Structural_Health_Monitoring_SHM_of_Composite_Aerospace_Structures_Using_Lamb_Waves) (pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [55] [http://learn.skillman.eu/pluginfile.php/337/mod\\_resource/content/1/Composite\\_Repair.pdf](http://learn.skillman.eu/pluginfile.php/337/mod_resource/content/1/Composite_Repair.pdf) (pristupljeno: kolovoz 2019.)

## POPIS SLIKA

Slika 1. Čelik u konstrukciji stajnog trapa.....	6
Slika 2. SR – 71 [10].....	7
Slika 3. Struktura kompozita [12].....	8
Slika 4. Slaganje suprotno orijentiranih listova [20] .....	12
Slika 5. Pčelinje saće [21].....	12
Slika 6. Dijelovi trupa [25] .....	16
Slika 7. Dijelovanje sila na trup zrakoplova uslijed djelovanja diferencijalnog tlaka [28].....	17
Slika 8. Raspodjela tlaka po visini u ISA uvjetima[33].....	20
Slika 9. Prozor B787 usporedno s A330/A340[35].....	23
Slika 10. Učinak pukotine na čvrstoću materijala[35].....	23
Slika 11. Struktura krila [36] .....	24
Slika 12. Ramenjača [37].....	24
Slika 13. Dijelovi mlaznog motora [40].....	28
Slika 14. GE90 mlazni motor [42].....	29
Slika 15. Kompozitni propeler [44].....	29
Slika 16. Postotak kompozita u zrakoplovima kroz povijest [45].....	30
Slika 17. Materijali u modelu B787 [47].....	32
Slika 18. Usporedba materijala u modelu A350 [50].....	33
Slika 19. Kokpit od aluminja kod modela A350 [51].....	34

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Materijali i njihove karakteristike [1] .....	4
Tablica 2. <i>Boeing 787</i> karakteristike[31, 32] .....	19



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
10000 Zagreb  
Vukelićeva 4

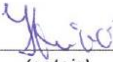
### IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj \_\_\_\_\_ završni rad  
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na  
objavlenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.  
Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz  
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.  
Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj  
visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.  
Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu \_\_\_\_\_ završnog rada  
pod naslovom Primjena kompozitnih materijala u elementima konstrukcije zrakoplova

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

U Zagrebu, 1.9.2019

Student/ica:

  
(potpis)