

# Materijali zrakoplovne konstrukcije

---

**Veselić, Pavo**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:524252>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-15**



*Repository / Repozitorij:*

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



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet prometnih znanosti

# **ZAVRŠNI RAD**

**MATERIJALI ZRAKOPLOVNE KONSTRUKCIJE**

**AIRCRAFT CONSTRUCTION MATERIALS**

Mentor: prof. dr. sc. Andrija Vidović

Student: Pavo Veselić

JMBAG: 0275058903

Zagreb, rujan 2022.

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

Zagreb, 30. ožujka 2022.

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

**ZAVRŠNI ZADATAK br. 6731**

Pristupnik: **Pavo Veselić (0275058903)**  
Studij: **Promet**  
Smjer: **Zračni promet**

Zadatak: **Materijali zrakoplovne konstrukcije**

**Opis zadatka:**

U uvodnim postavkama potrebno je definirati predmet istraživanja, objasniti svrhu i cilj istraživanja, dati osvrt na dosadašnja istraživanja te ukratko prikazati kompoziciju rada. Kronološki prikazati razvoj i primjenu materijala koji su se koristili u zrakoplovnoj konstrukciji. Prikazati podjelu materijala koji se najčešće koriste u zrakoplovnoj konstrukciji. Materijale treba podijeliti na metale i nemetale, dok se kompozitni materijali mogu analizirati zasebno. Za svaki od materijala nužno je prikazati njihove osnovne značajke te ukazati na prednosti i nedostatke. Isto tako, za materijale koji su prikazani u završnom radu potrebno je navesti za koji od konstruktivnih dijelova zrakoplovne konstrukcije se isti primjenjuju i zašto. Izvesti konkretne zaključke o analiziranoj tematici u završnom radu i interpretirati rezultate istraživanja.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

*Andrija Vidović*

prof. dr. sc. Andrija Vidović

## SAŽETAK

Prvi osnovni materijali koji su se koristili u zrakoplovstvu bili su drvo i čelik. Daljnjim razvojem zrakoplovstva došlo je do potrebe za boljim performansama zrakoplova te su istraženi i razvijeni novi materijali i njihova svojstva. Materijali i njihova svojstva moraju zadovoljavati brojne zahtjeve u zrakoplovstvu kako bi se koristili stoga su detaljno proučeni i analizirani. U današnje doba koriste se brojni materijali pri izradi zrakoplovne konstrukcije poput metala, nemetala i kompozitnih materijala. Ovim završnim radom prikazani su funkcionalni i eksploatacijski zahtjevi te su analizirana tehnološka svojstva koja materijal mora posjedovati kako bi se mogao koristiti pri izradi zrakoplovne konstrukcije. Nakon analize svojstava su prikazani i opisani materijali iz skupine metala, nemetala te kompoziti koji se koriste pri izradi zrakoplovne konstrukcije.

**KLJUČNE RIJEČI:** materijali; zrakoplov; metali; nemetali; kompozitni materijali; konstrukcija

## SUMMARY

The initial materials used in the aircraft industry were wood and steel. Gradual development of the industry required better performances of the aircrafts so the people started to research and develop new materials and their characteristics. The materials and their characteristics have to meet multiple requirements in order to be used so they have been thoroughly studied and examined. Nowadays the industry uses different materials for airframe like metals, non-metals and composite materials. This final paper presented the operational and working stresses and analyzed the technological characteristics which a specific material has to have in order to be used for constructing the airframe. It also showed and described the materials from different categories: metal, non-metal and composite materials which are used for constructing the airframes.

**KEY WORDS:** materials; aircraft; metals; non-metals; composite materials; construction

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. ZRAKOPLOVNI MATERIJALI KROZ POVIJEST .....	2
3. OSNOVNE ZNAČAJKE MATERIJALA .....	4
3.1 Zahtjevi za odabir materijala .....	4
3.2 Svojstva materijala .....	5
3.2.1 Čvrstoća .....	5
3.2.2 Gustoća .....	6
3.2.3 Krutost .....	7
3.2.4 Dinamička izdržljivost .....	8
3.2.5 Lomna žilavost .....	11
3.2.6 Otpornost na koroziju .....	12
3.2.7 Mehanička otpornost pri visokim temperaturama .....	12
3.2.8 Specifična čvrstoća i specifična krutost .....	12
3.2.9 Sigurnost .....	13
4. METALI .....	14
4.1 Čelik .....	14
4.1.1 Obični ugljični čelici .....	14
4.1.2 Legirani čelici .....	15
4.2 Nikl .....	16
4.3. Titan .....	17
4.3.1 $\alpha$ legure .....	18
4.3.2 $\beta$ legure .....	18
4.3.3 $\alpha+\beta$ legure .....	19
4.4 Berilij .....	19
4.5 Slitine na bazi aluminija .....	20
4.6 Slitine na bazi magnezija .....	20

5. NEMETALI .....	22
5.1.1 Drvo.....	22
5.1.2 Bakelit .....	23
5.1.3 Plastika .....	23
5.1.4 Fiberglas .....	23
5.1.5 Tekstolit.....	24
5.1.6 Pleksi staklo.....	24
5.1.7 Staklo.....	24
5.1.8 Stiropor.....	25
5.1.9 Guma .....	26
6. KOMPOZITNI MATERIJALI .....	27
6.1 Matrica .....	27
6.1.1 Polimerne matrice .....	27
6.1.2 Metalna matrica.....	27
6.1.3 Keramička matrica .....	28
6.2 Ojačalo .....	28
6.2.1 Kompoziti pojačani česticama .....	28
6.2.2 Kompoziti pojačani vlaknima .....	28
6.2 Strukturni kompoziti .....	29
7. ZAKLJUČAK .....	31
LITERATURA.....	32
POPIS SLIKA .....	34
POPIS TABLICA.....	35

# 1. UVOD

Kroz povijest čovjek je pokušavao letjeti mnogo puta, a prvi pravi let zabilježen je 1903. godine od strane braće Wright koji su samostalno izradili zrakoplov od drva. Tim letom smatra se početak današnjeg zrakoplovstva kakvog mi znamo. Od tada pa do danas zrakoplovstvo je najrazvijenija i najbrže rastuća prometna grana na svijetu. Materijali zrakoplovne konstrukcije uvelike u se promijenili od početaka zrakoplovstva. Prvi osnovni materijal u izradi zrakoplovne konstrukcije bilo je drvo te čelik, dok materijali koji se danas koriste nisu još bili poznati. Daljnjim razvojem zrakoplovstva dolazilo je do sve većih zahtjeva po pitanju materijala, stoga je neophodno bilo pronaći i materijale koji će zadovoljiti sve te zahtjeve. Budući da se današnji zrakoplovi koriste za prijevoz putnika i tereta na velikim udaljenostima pri velikim brzinama i visinama nužno je da materijali od kojih su izrađeni budu sigurni te svojim svojstvima zrakoplovu omogućće najbolje moguće performanse u letu.

Svrha istraživanja u završnom radu je prikazati materijale koji se koriste pri izradi zrakoplovne konstrukcije s ciljem specifikacije prednosti i nedostataka uporabe istih za pojedine dijelove zrakoplovne strukture.

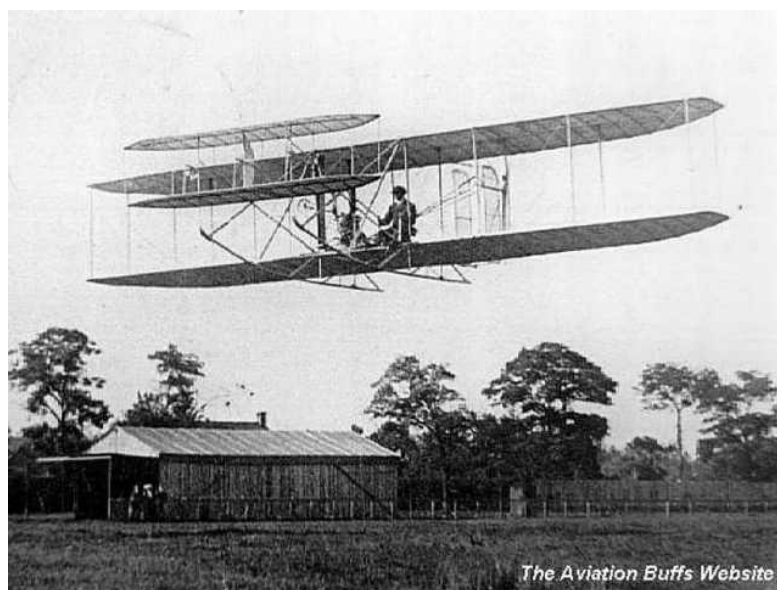
Rad je podijeljen u 7 poglavlja:

1. Uvod
2. Zrakoplovni materijali kroz povijest
3. Osnovne značajke materijala
4. Metali
5. Nemetali
6. Kompozitni materijali
7. Zaključak

U prvom poglavlju je definiran predmet istraživanja, svrha i cilj istraživanja te je predočena struktura rada. U drugom poglavlju je dan kronološki prikaz uporabe materijala kroz povijest u zrakoplovstvu. Treće poglavlje opisuje značajke materijala, odnosno svojstva materijala. U četvrtom poglavlju je dan prikaz metala koji se koriste u zrakoplovstvu, dok se u petom poglavlju analiziraju nemetali. U šestom poglavlju se obrađuju kompozitni materijali. U sedmom, zaključnom poglavlju, dana su zaključna razmišljanja o analiziranoj tematici završnog rada.

## 2. ZRAKOPLOVNI MATERIJALI KROZ POVIJEST

Materijali u zrakoplovstvu uvelike su se promijenili od samih početaka u smislu kvalitete, trajnosti, zahtjeva performansi, funkcionalnosti kao i mnogi drugih kriterija. U samim počecima kriteriji pri odabiru materijala za zrakoplov bili su da bude što manje mase i veće čvrstoće, a ostali kriteriji poput cijene, žilavosti, trajnosti su bili manje važni. Mnogi kriteriji koji su u današnje vrijeme izrazito važni u samim počecima nisu bili prepoznati kao važni. Materijal koji je u to vrijeme zadovoljavao uvjet odnosa težine i čvrstoće bilo je drvo. Na slici 1. prikazan je zrakoplov braće Wright kojemu je osnovni materijal bilo drvo.



**Slika 1.** Prikaz zrakoplova kojemu je osnovni materijal bilo drvo

Izvor: [1]

U razdoblju 1920.-1930. kriterij za odabir materijala se proširio uzimajući u obzir velik broj čimbenika koji utječu na performanse i sposobnosti zrakoplova pa su metalne strukture zamijenile drvo kao osnovni materijal. Dizajn zrakoplova znatno se promijenio zbog razvoja vojnog i komercijalnog zrakoplovstva. Poboljšavanjem performansi u 1930-im dovele su do toga da zrakoplov može letjeti velikim brzinama na velikim udaljenostima noseći težak teret. S vremenom novi kriteriji zahtijevali su ne samo nove materijale već i nove postupke proizvodnje i obrade tih materijala. Prekretnica u razvoju novih materijala i zahtjeva koji su isti morali zadovoljiti se dogodilo tijekom i nakon Drugog svjetskog rata [2]. Uvedena je



radio i radarska navigacija, napravljena je putnička kabina pod tlakom i povećana je sigurnost zrakoplova.

Novi materijali poput slitina lakih obojenih metala i čelika doprinijele su čvrstoći i sigurnosti zrakoplova. Razvijene su slitine na bazi magnezija te slitine čelika s niklom i kromom. Daljnjim razvojem zrakoplovstva dolazilo je do novih zahtjeva za materijalima pa je napravljen aluminiji koji je lagan i jak materijal.

Pri izradi zrakoplova u današnje vrijeme sve se više koriste novi materijali koji zadovoljavaju sve veće i kompleksnije eksploatacijske zahtjeve zrakoplova. Jedan od glavnih razloga za poboljšanjem materijala je cijena jer udio materijala u cijeni zrakoplova iznosi 60%. Novi materijali koji zadovoljavaju sve te zahtjeve su kompozitni materijali, legure čelika te slitine magnezija, aluminijska i titana. Novi materijali imaju brojne prednosti poput male mase, visoke čvrstoće, dobre otpornosti pri visokim i niskim temperaturama, dinamičke izdržljivosti i drugih.

Svaki materijal koji se danas koristi za izradu zrakoplova mora zadovoljavati određene zahtjeve, a to su mala masa, otpornost na umor, u uvjetima statičkog opterećenja visoka mehanička otpornost, otpornost na koroziju, otpornost na naglo širenje pukotina, otpornost na gorenje, mehanička otpornost pri visokim temperaturama, zadovoljavajuća krutost, apsorpcija buke i vibracija. Pri odabiru materijala važnu ulogu čini dostupnost, raspoloživost i reciklažnost materijala te sposobnost materijala za obradu ili oblikovanje nekim toplinskim postupkom [3].

## **3. OSNOVNE ZNAČAJKE MATERIJALA**

Značajke materijala čine funkcionalni i eksploatacijski zahtjevi koje materijali moraju zadovoljavati da bi se koristili pri izradi konstrukcije zrakoplova, a od primarne važnosti pri odabiru materijala su svojstva materijala koje je potrebno dovoljno poznavati kako bi se mogao odabrati odgovarajući materijal koji je sposoban izdržati razna opterećenja koja zrakoplov trpi.

### **3.1 Zahtjevi za odabir materijala**

U zrakoplovnoj industriji potrebno je imati znanja i razumijevanja o materijalima kako bi ih mogli ispravno koristiti pri izradi konstrukcije zrakoplova. Svaki materijal ima određene značajke odnosno osobine koje ga karakteriziraju te mu određuju mogućnost korištenja [4]. U današnje vrijeme zrakoplov je prijevozno sredstvo za koje se najviše koriste novi materijali pri izradi konstrukcije, a razlozi za to su:

1. Uporabne karakteristike zrakoplova poput veličine, težine, brzine, nosivosti, sigurnosti i trajnosti su znatno poboljšane;
2. Uvjeti rada i zahtjevi koji se postavljaju na strojni dio ili element konstrukcije su promijenjeni;
3. Tokom uporabe dolazi do kvarova uzrokovanim materijalima kao što su deformacije, lomovi, korozije, prekomjerno trošenje;
4. Primjena normi, propisa i zakona;
5. Postizanje bolje konkurentnosti i smanjenje troškova.

Materijali za izradu zrakoplova moraju omogućavati što bolje performanse zrakoplovu uz što nižu cijenu, a klasični materijali ne mogu ispuniti sve te zahtjeve pa se pojavljuju novi materijali koji su poboljšani te zadovoljavaju tražene eksploatacijske zahtjeve. Funkcionalni i eksploatacijski zahtjevi koje zrakoplovni materijali moraju zadovoljavati su:

1. Mala masa;
2. U uvjetima statičkog opterećenja visoka mehanička otpornost;
3. Zadovoljavajuća krutost;
4. Otpornost na naglo širenje pukotine;
5. Otpornost umoru;

6. Korozijska postojanost;
7. Mehanička otpornost pri visokim temperaturama;
8. Otpornost na gorenje;
9. Apsorpcija vibracija i buke.

Uz osnovne zahtjeve koji su definirani određenim svojstvom materijala u obzir se moraju uzeti izvedeni kriteriji koji sadrže više svojstava kao što su:

1. Specifična čvrstoća – omjer vlačne čvrstoće i gustoće materijala;
2. Specifična krutost – omjer modula elastičnosti i gustoće;
3. Sigurnost – umnožak lomne žilavosti i granice razvlačenja.

Za optimalan izbor materijala pored funkcionalnih i eksploatacijskih svojstava još su važna njegova tehnološka svojstva koja opisuju sposobnost materijala za obradu ili oblikovanje nekim tehnološkim postupkom, raspoloživost, nabavljivost te reciklažnost materijala.

Tražena svojstva koja materijal mora posjedovati definirana su na temelju iznad navedenih zahtjeva. Izbor materijala predstavlja problem traženja najpovoljnijeg rješenja u postojećim uvjetima te se uvijek traži kompromisno ispunjenje više uvjeta pri izboru materijala [5].

## **3.2 Svojstva materijala**

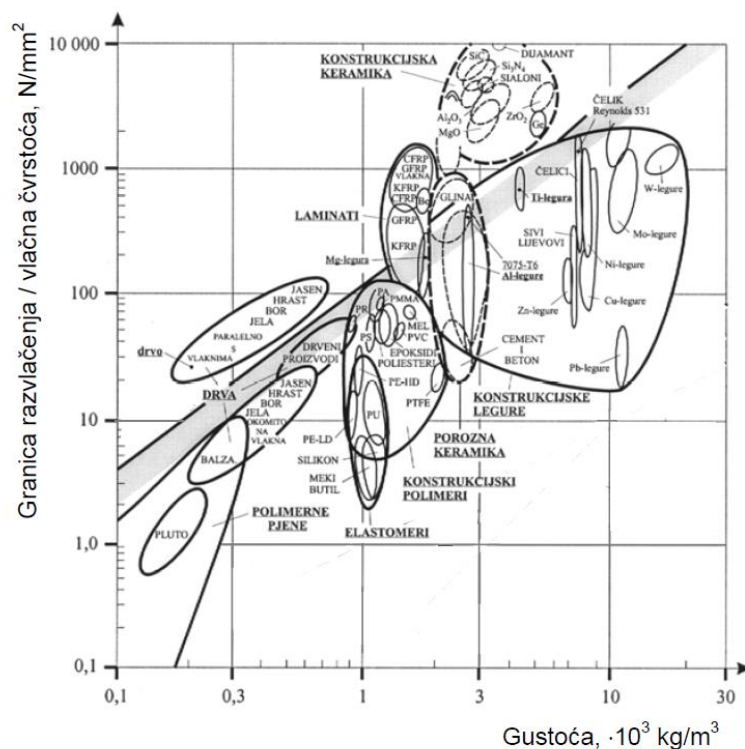
Svojstva materijala od primarne su važnosti kada se odabiru materijali za zrakoplovnu konstrukciju stoga ih je važno poznavati kako bi mogli odabrati materijal s najviše odgovarajućih svojstava da taj materijal ima sposobnost izdržati različita opterećenja. Osnovna svojstva koja materijal mora zadovoljavati pri izradi zrakoplovne konstrukcije su: čvrstoća, gustoća, krutost, dinamička izdržljivost, lomna žilavost, otpornost na koroziju, mehanička otpornost pri visokim temperaturama, specifična čvrstoća i specifična krutost, sigurnost [6].

### **3.2.1 Čvrstoća**

Čvrstoća je mehaničko svojstvo materijala da se odupre stresu i deformacijama bez da dođe do trajnog loma materijala [7]. Za izradu dijelova zrakoplova potrebno je koristiti

materijale odgovarajuće mehaničke otpornosti da bi mogli izdržati razna opterećenja koja se mogu pojaviti tijekom eksploatacije.

U uvjetima konstantnog djelovanja opterećenja mehaničku otpornost određuje čvrstoća materijala i granica razvlačenja. Naprezanje prema kojem se uz odabrani stupanj sigurnosti utvrđuje dopušteno naprezanje pri radu strojnih dijelova i elemenata konstrukcije naziva se granica razvlačenja. Naprezanje koje djeluje na materijal ne smije prijeći vrijednost granice razvlačenja zbog pojave plastične deformacije odnosno trajnog loma. Ovisnost mehaničke otpornosti i gustoće različitih materijala prikazani su na slici 2 [5].



**Slika 2.** Prikaz ovisnosti mehaničke otpornosti i gustoće različitih materijala

Izvor: [5]

### 3.2.2 Gustoća

Gustoća je svojstvo materijala koje je određeno odnosom mase materijala i njegovog volumena. Među najvažnijim zahtjevima pri odabiru zrakoplovnih materijala su mala masa i niska gustoća. Primjenom materijala koji zadovoljavaju te uvjete može se postići velika ušteda na težini konstrukcije zrakoplova što donosi razne prednosti kao što su povećanje nosivosti, ekonomska isplativost, smanjenje ukupne težine zrakoplova, a s time dolazi do smanjenja potrošnje goriva te smanjena operativnih

troškova. Materijali koji spadaju u tu kategoriju su aluminijske ili magnezijeve legure, kompozitni materijali, polimeri i ostali, a u slijedećoj tablici prikazane su gustoće konstrukcijskih legura [5].

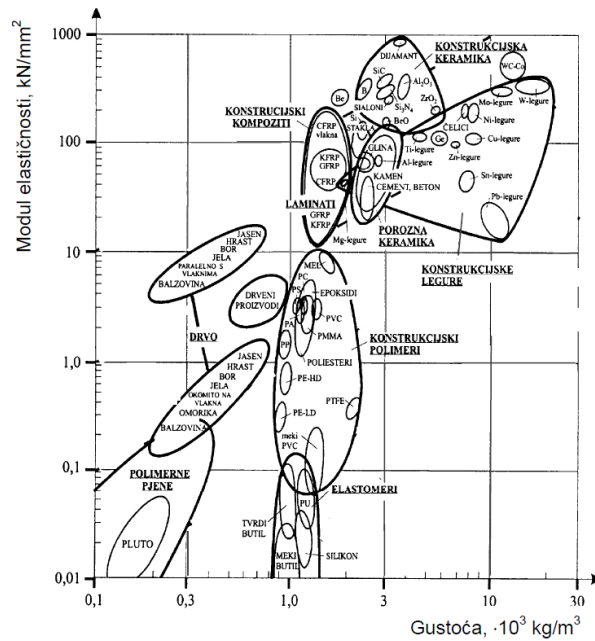
**Tablica 1.** Gustoće konstrukcijskih legura

Materijal	Gustoća kg/m <sup>3</sup>
Aluminijske legure	2.700
Titanove legure	4.500
Sivi lijev	7.250
Čelik	7.850
Niklove legure	8.900
Bakarne legure	8.930

Izvor: [5]

### 3.2.3 Krutost

Krutost je svojstvo materijala da se odupre bilo kakvoj deformaciji. Modul elastičnosti određuje krutost materijala te je njegova veličina ovisna izravno o čvrstoći veze strukturnih jedinica u amorfnoj ili kristalnoj strukturi. Visoka vrijednost modula elastičnosti ukazuje na to da je veza čvrsta, a ukoliko je vrijednost ove elastične konstante niska, čvrstoća veze je slabija te materijal ima manju krutost. Na slici 3 je prikazana ovisnost modula elastičnosti o gustoći materijala [5].



**Slika 3.** Prikaz ovisnosti modula elastičnosti o gustoći materijala

Izvor: [5]

### 3.2.4 Dinamička izdržljivost

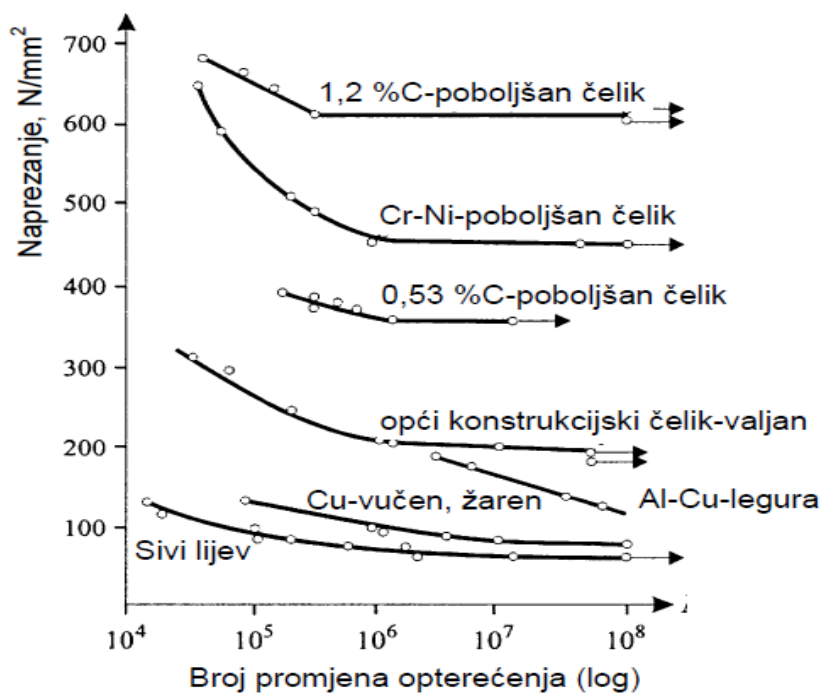
Dijelovi zrakoplova napregnuti su statičkim i dinamičkim naprežanjem pa je stoga potrebno materijale statički i dinamički ispitati da bi dobili sva mehanička svojstva materijala potrebna za dizajniranje. Dinamičko naprežanje materijala promjenjivo je tijekom korištenja te njegova vrijednost ne prelazi granicu razvlačenja, ali može doći do loma materijala nakon nekog vremena. Uslijed dugotrajnog dinamičkog naprežanja postupno dolazi do razaranja materijala odnosno dolazi do loma materijala. U tablici 2 prikazana su razna oštećenja materijala u zrakoplovstvu te njihova zastupljenost u postotku, iz čega je vidljivo da je najzastupljenije oštećenje lom materijala nastalo umorom materijala.

**Tablica 2.** Prikaz zastupljenosti oštećenja materijala u zrakoplovstvu

<b>Vrsta oštećenja</b>	<b>Zastupljenost, %</b>
Opća korozija	3
<b>Lom od umora</b>	61
Preopterećenje	18
Visokotemperaturna korozija	2
Napetosna korozija	9
Trošenje abrazijom i erozijom	7

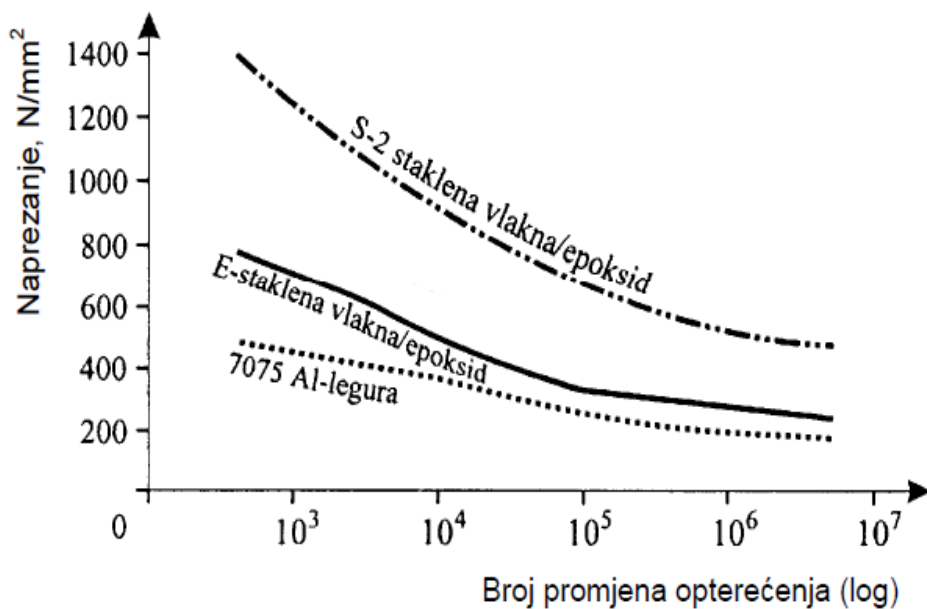
Izvor:[5]

Dinamički opterećene konstrukcije je potrebno dimenzionirati na vrijednost dinamičke izdržljivosti kako bi što manje dolazilo do loma materijala. Najveće dinamičko naprezanje koje materijal izdrži nakon beskonačnog broja promjena opterećenja naziva se dinamička izdržljivost. Vrijednost dinamičke izdržljivosti određuje se na temelju Wohlerove krivulje, a slika 4 prikazuje Wohlerovu krivulju različitih metalnih materijala. Wohlerova krivulja asimptotski se približava vrijednosti dinamičke izdržljivosti kod metalnih materijala, a posebno konstrukcijskog čelika dok to nije slučaj kod nekih polimera i polimernih kompozita kod kojih se pouzdano ne može odrediti iznos dinamičke izdržljivosti te je primjer ponašanja tih materijala prikazan na slici 5 [5].



Slika 4. Dinamička izdržljivost metalnih materijala

Izvor: [5]



Slika 5. Ponašanje materijala pri dinamičkom naprezanju

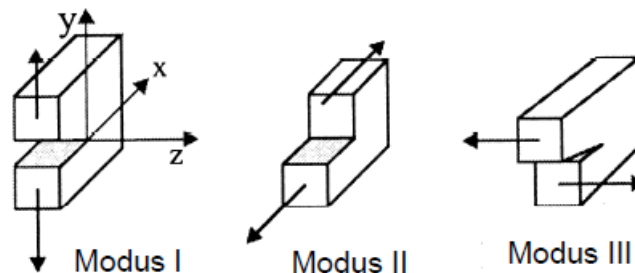
Izvor: [5]



### 3.2.5 Lomna žilavost

Žilavost je poželjno svojstvo kod materijala u zrakoplovstvu jer materijal može izdržati naprezanje bez da dođe do loma tako što se rastegne ili na neki drugi način deformira [8]. Da bi se izbjegli različiti lomovi koji mogu dovesti do neželjenog rušenja zrakoplova materijali zrakoplovne konstrukcije moraju biti otporni na pojavu i naglo širenje pukotina. Pogreške u mikrostrukтури i pukotine predstavljaju mjesta koncentracije naprezanja kada se uslijed porasta naprezanja na tim pojedinim mjestima javlja početna pukotina koja se s vremenom širi. Najopasnije su pukotine koje se šire velikom brzinom jer se lom teško može predvidjeti te je zbog toga potrebno poznavati veličinu naprezanja oko pukotine. Faktor intenziteta naprezanja je veličina koja opisuje raspored naprezanja oko pukotine te se označava sa  $K$  [5].

Otvaranje pukotine moguće je na tri načina te se pri tom razlikuju faktori intenziteta naprezanja. Slika 6 prikazuje moduse odnosno načine pojave pukotina.



**Slika 6.** Način pojave pukotine

Izvor: [5]

Modus 1 nastaje na dijelovima sa vanjskim i unutarnjim pukotinama opterećenih na savijanje, vlak i kod konstrukcija opterećenih tlačno te taj način ima najveće značenje u praksi. Način 2 nastaje kod uzdužnog smicanja, a način 3 kod poprečnog smicanja materijala. Lomna žilavost je kritična veličina faktora intenziteta naprezanja pri kojem nastaje pukotina jednostavnim otvaranjem te u uvjetima ravninskog stanja deformacije započinje nestabilno širenje iste. Kritično naprezanje pri kojem dolazi do loma statički opterećenih dijelova konstrukcija se određuje na temelju lomne žilavosti te pogrešaka u materijalu koje su nastale pri izradi ili eksploataciji.

### **3.2.6 Otpornost na koroziju**

Spontano razaranje materijala pod djelovanjem nekog medija čime dolazi do uništavanja mehaničkih i fizikalnih svojstava materijala naziva se korozija te zbog toga materijali zrakoplovne konstrukcije moraju biti postojani na koroziju. Postoji više različitih pojava korozije, a u zrakoplovstvu posebno opasne su korozija ljuštenjem i napetosna korozija.

Oblik selektivne korozije koja se ne pojavljuje jednolično po cijeloj površini nego samo lokalno na izdvojenim mjestima te u uvjetima istovremenog djelovanja vlačnog naprezanja i agresivnog medija naziva se napetosna korozija.

Kada se na površini materijala stvaraju različiti kemijski produkti u dodiru s okolišem dolazi do drugog oblika korozije, tj. do ljuštenja materijala [5].

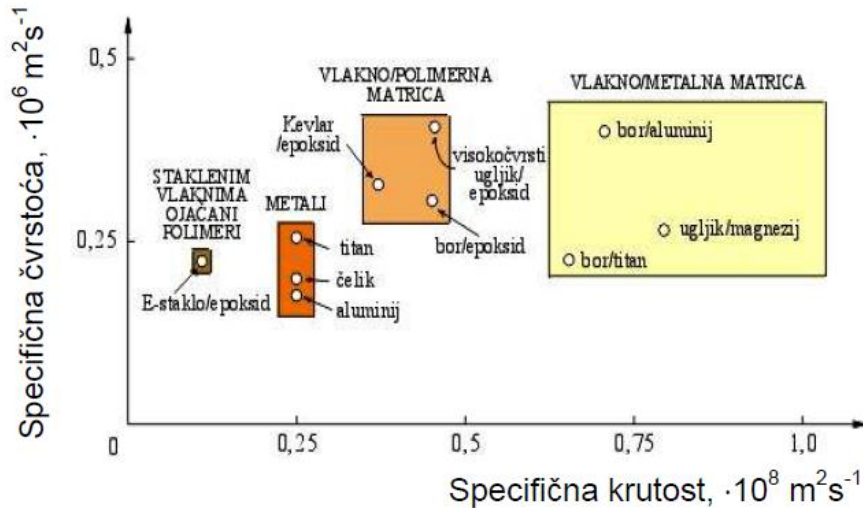
### **3.2.7 Mehanička otpornost pri visokim temperaturama**

Tijekom upotrebe razni dijelovi zrakoplova su izloženi visokim temperaturama pri čemu konstrukcijski materijali moraju zadržati visoku mehaničku otpornost. Povećanjem temperature dolazi do promjene nekih svojstava materijala pa tako dolazi do smanjenja vlačne čvrstoće, granice razvlačenja, modula elastičnosti, dinamičke izdržljivosti, a povećava se istežljivost materijala te može doći do puzanja materijala. Toplinski aktiviran proces deformacije materijala koji nastaje tokom dugotrajnog djelovanja konstantnog opterećenja pri povišenoj temperaturi naziva se puzanje materijala. Granica puzanja i statička izdržljivost definiraju otpornost prema puzanju. Vlačno naprezanje koje pri temperaturi  $\vartheta$  ispitivanja i određenog vremena ispitivanja ostavlja određenu deformaciju u epruveti naziva se granica puzanja, a vlačno naprezanje koje pri temperaturi  $\vartheta$  nakon određenog trajanja ispitivanja uzrokuje lom epruvete je statička izdržljivost [5].

### **3.2.8 Specifična čvrstoća i specifična krutost**

Obzirom na gustoću, specifična čvrstoća i specifična krutost predstavljaju izvedena svojstva materijala. Omjerom čvrstoće i gustoće prikazana je specifična čvrstoća krhkih materijala, a omjerom granice razvlačenja i gustoće duktilnih materijala. Omjerom modula

elastičnosti i gustoće iskazana je specifična krutost. Visoka specifična čvrstoća i visoka specifična krutost zahtijevane su kod zrakoplovnih materijala jer moraju biti što čvršći, krući i biti što manje mase. Na slici 7 prikazana je usporedba specifične krutosti i specifične čvrstoće nekih polimera i metala [5].



**Slika 7.** Usporedba specifične čvrstoće i specifične krutosti materijala

Izvor: [5]

### 3.2.9 Sigurnost

Sigurnost se prikazuje umnoškom visoke konvencionalne granice razvlačenja i visoke lomne žilavosti što govori da materijali u zrakoplovstvu moraju biti otporni na pojavu plastične deformacije, širenje pukotina i biti čvrsti [5]. Primarni cilj životnog vijeka zrakoplova je očuvanje integriteta strukture pa treba imati u vidu da u eksploataciji vrijednosti sila mogu biti premašene te da po svojim mehaničkim svojstvima materijali odstupaju od idealnog pa je potrebno koristiti faktor sigurnosti pri dimenzioniranju strukturnih dijelova zrakoplova. Prilikom dimenzioniranja ključnih dijelova zrakoplova koristi se visoki faktor sigurnosti, a kod dijelova manjeg značenja ono se smanjuje pa se tako dijelovi manjeg značaja namjerno izvedu oslabljeni kako bi u slučaju izvanrednog događaja na zrakoplovu oni prvi otkazali [9].

## 4. METALI

U zrakoplovstvu pri izradi konstrukcije zrakoplova metali koji se koriste su: čelik, nikl, titan, berilij, slitine na bazi aluminija i slitine na bazi magnezija. Metali kao materijali za korištenje u zrakoplovstvu imaju razne prednosti poput mogućnosti poboljšanja svojstava, raspoloživosti sirovina te povoljne cijene. Dijelovi motora, trupa te krila su dijelovi zrakoplova gdje se najviše koriste metali.

### 4.1 Čelik

Čelik je slitina željeza s udjelom ugljika 2,06% te zbog svojih svojstava smatra se najpouzdanijim materijalom za upotrebu kod konstrukcije zrakoplova. Najviše se koristi kod izrazito opterećenih dijelova konstrukcije, spojeva te vitalnih dijelova zrakoplova. Prema svom sastavu i osobinama čelični materijali se dijele u dvije skupine, a to su: obični ugljični čelici i legirani čelici [9].

#### 4.1.1 Obični ugljični čelici

Osnovne karakteristike čeliku daje ugljik koji je njegov glavni i osnovni element te o njemu ovise karakteristike poput uvjeta termičke obrade, žilavosti, otpornosti i krutosti. Uz ugljik ovaj oblik čelika sadrži brojne elemente u obliku primjese poput mangana, silicija koji poboljšavaju svojstva čelika te sumpora i fosfora koji imaju štetan utjecaj na svojstva čelika. Čelici ovise o postotku ugljika u sastavu pa se oni s većim postotkom mogu pojačavati i popravljati svoju otpornost uz pomoć kaljenja, a oni s manjim postotkom ugljika se popravljaju postupkom cementiranja pogotovo na dijelovima koji su izloženi habanju, gnječenju i povišenom tlaku. Vrste čelika s udjelom čelika manjim od 0,2% koriste se za cementiranje. U zrakoplovnim konstrukcijama veliko značenje ima varenje čelika i ono ovisi o udjelu ugljika u sastavu. Za pouzdano i dobro zavarivanje čelika udio ugljika maksimalno može biti do 0,35%, a zavarivanje je bolje ukoliko je taj postotak manji [9].

Tri vrste ugljičnih čelika se uglavnom koriste u zrakoplovstvu, a to su:

- Nisko ugljični čelik - ima osobine visoke plastičnosti i podoban je za plinsko zavarivanje zbog udjela ugljika manjeg od 0,25% te otpornosti od 40 N/mm<sup>2</sup>. Koriste se za izradu dijelova uređaja i opreme, tankozidnih cijevi, okova i zakovica [9].
- Srednje ugljični čelik - udio ugljika u ovom čeliku je 0,3 – 0,4% te otpornosti 50 – 60 N/mm<sup>2</sup>. Koriste se u izradi šipki, profila te za dijelove i elemente koji su manje opterećeni [9].
- Otporniji legirani čelici - u ovu vrstu spadaju čelici otpornosti oko 60 N/mm<sup>2</sup> te udjelom ugljika većim od 0,4%. Koristi se u izradi čeličnih kabela, zateznih žica te slabijih opruga [9].

## **4.1.2 Legirani čelici**

Legirani čelici nastaju dodavanjem raznih elemenata koji im poboljšavaju fizička, mehanička i kemijska svojstva te im ugljik nije presudan za postizanje određenih svojstava. Različita svojstva su moguća kod legiranih čelika od mekih do izrazito čvrstih, otpornih na visoke temperature, vatru i koroziju. Legirani čelici se dijele prema količini legiranih elemenata pa prema tome mogu biti: mikrolegirani čelici, niskolegirani čelici, legirani čelici i visoko legirani čelici [9].

### **4.1.2.1 Mikrolegirani čelici**

Mikrolegirani ili sitno zrnasti čelici uglavnom su legirani manganom količine više od 1.5% i manjim količinama drugih elemenata poput aluminijske, vanadijske, niobijevske, bakarske, a količina ugljika je niska pa se teško zakaljuje. Struktura sitnog zrna poboljšava im žilavost i čvrstoću, posebno na niskim temperaturama. Ova vrsta legiranog čelika najviše se koristi za izradu zavarenih konstrukcija [10]. Pri izradi zrakoplovne konstrukcije koristi se vrlo skupi spoj vanadij-čelik koji čeliku poboljšava žilavost, a koristi se za rad na visokim temperaturama i za izradu opruga [3].

### **4.1.2.2 Niskolegirani čelici**

Niskolegirani čelici su čelici legirani molibdenom i kromom u količini 2-3% ukupno i u manjim količinama dodatno sa vanadijem, niobijem i niklom, a ovisno o udjelu ugljika moguće je dobiti metale visoke tvrdoće i čvrstoće. Koriste se za izradu napregnutih konstrukcija i strojnih dijelova te su zbog veće tvrdoće otporniji na trošenje [10]. U izradi zrakoplovne konstrukcije koristi se spoj nikel-čelik koji ima odlična svojstva poput visoke

žilavosti, tvrdoće, otpornosti na koroziju te je otporan na sve vrste udara i dinamičkih naprezanja što ga čini najskupljim legirajućem elementom [3].

#### **4.1.2.3 Legirani čelici**

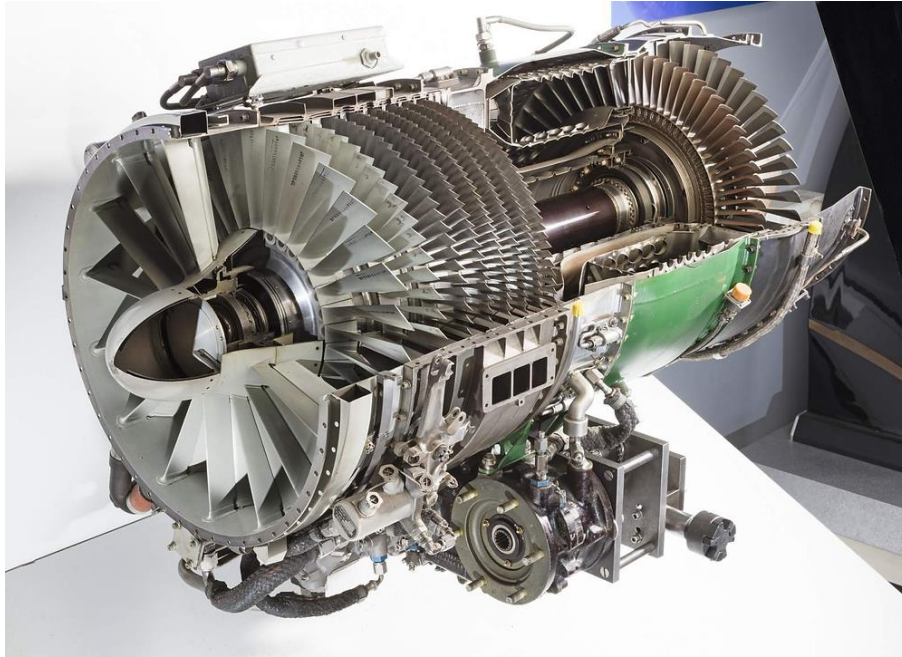
Legirani čelici sastavljeni su od legiranih elemenata poput nikla, vanadija, kroma, titana, niobija, kobalta i volframa u količini od 5% do 10% te povišenim sadržajem ugljika [10]. Spoj krom-nikl-volfram koristi se u zrakoplovnoj konstrukciji za dijelove motora zbog svoje vatrostalnosti [3].

#### **4.1.2.4 Visoko legirani čelici**

Kromom, niklom te manjom količinom ostalih elemenata legirani su visoko legirani čelici. Otporni su na koroziju, a kod čelika s višim udjelom ugljika i kroma u sastavu mogu se zakaliti do najviših tvrdoća [10]. U izradi zrakoplovnih materijala jedan od legiranih čelika koji se koriste je mangan čelik koji u čeliku poboljšava njegova svojstva poput tvrdoće, otpornosti, sposobnosti zavarivanja i osobnosti kaljenja, a većinom se koristi u izradi svornjaka [9].

## **4.2 Nikl**

Željezo kao osnovni materijal u slitinama potpuno je eliminirano te ulogu osnovnog materijala u suvremenim slitinama najvišeg stupnja vatrostalnosti preuzeo je nikl. Na temperaturi od 1.450°C talište je nikla, te se pri toj temperaturi kristalizira u plošno centriranu rubnu rešetku. Nikl pri temperaturi nižoj od 360°C je slabo magnetičan, a na 400°C zadržava čvrstoću. Otporan je na koroziju u raznim agresivnim sredinama te na oksidaciju, a kod gnječnog nikla čvrstoća ide do 850 MPa dok rastezljivost raste do 40% [10]. Zbog izdržljivosti konstruktivnog materijala vatrostalnih kvaliteta niklove slitine upotrebljavaju se za izradu termički i mehanički najopterećenijih dijelova plinskih turbina [9]. Slika 8 prikazuje motor zrakoplova gdje se nikl primjenjuje kao materijal za izradu turbine.



**Slika 8.** Prikaz plinske turbine zrakoplova izrađene od nikla

Izvor: [11]

Najveći razlog razvitka legura nikla su radi njihove mehaničke otpornosti pri visokim temperaturama i otpornosti na koroziju. Razvoj materijala imena superlegure došlo je zbog sve većih zahtjeva za materijalima koji izdržavaju visoke radne temperature. Najpoznatije vrste superlegura američkog podrijetla su „Hasteloy“ i „Inconel“ te engleski „Ni-monik 80“.

### 4.3. Titan

Titan je materijal koji se u novije doba koristi sve više u zrakoplovstvu zbog svojih vrlo pogodnih i povoljnih konstruktivnih osobina. Svojstva titana slična su čelikovim uz specifičnu težinu koja je za polovinu manja te svojstvo koje se posebno ističe je visoka otpornost na povišenim temperaturama. Titan se koristi samo kao legiran s elementima poput aluminija, mangana, molibdena i vanadija [9]. U zrakoplovstvu legirani titan se koristi za dijelove krila, trupa i dijelove motora nadzvučnih zrakoplova koji podnose visoke temperature u letu [10]. Čvrstoća titana je  $120 \text{ N/mm}^2$ , gustoća  $4.500 \text{ kg/m}^3$ , a podnosi temperature do  $550^\circ\text{C}$ . Titan je skuplji od čelika i nikla, ali se smatra isplativim unatoč skupom materijalu i trošku obrade. Zbog svoje male mase i visoke pouzdanosti primjena titana u zrakoplovstvu je sve veća, a

primjenjuje se u obliku legura poznatih kao:  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $(\alpha + \beta)$  [3]. Slika 9 prikazuje nadzvučni zrakoplov SR-71 Blackbird čiji su trup i krila izrađeni od titana.



**Slika 9.** Prikaz nadzvučnog zrakoplova SR-71 Blackbird izrađenog uglavnom od titana

Izvor: [12]

### 4.3.1 $\alpha$ legure

Elementi poput ugljika, kisika, dušika, aluminijsa i kositra su glavni stabilizatori  $\alpha$  faze. Za uporabu pri povišenim temperaturama od  $370^{\circ}\text{C}$  do  $550^{\circ}\text{C}$  preferiraju se  $\alpha$  legure koje sadrže kositar, aluminijsa i cirkoni. Pri višim temperaturama  $\alpha$  legure su otpornije puzanju od  $\alpha + \beta$  i  $\beta$  legura jer su manje osjetljive na elemente koji uzrokuju krhkost poput kisika, dušika, ugljika, a  $\alpha$  legure ne mogu očvrnuti postupkom toplinske obrade za razliku od  $\beta$  i  $\alpha + \beta$  legura. Glavni legirni element  $\alpha$  legura uz titan je aluminijsa te kositar, a najčešća legura je  $\text{TiAl5Sn2,5}$ . Dugo godina uspješno se koristi u zrakoplovstvu zbog svojih svojstava, a to su: korozijska i oksidacijska postojanost te odlična svojstva pri niskim temperaturama [5].

### 4.3.2 $\beta$ legure

$\beta$  legure visoko su prokaljive legure s potpuno  $\beta$  faznom mikrostrukturom nakon rastvornog žarenja i gašenja te mogu postići visoku čvrstoću toplinskom obradom posebno u



hladnom stanju. Prednosti  $\beta$  legura su zavarljivost, visoka prokaljivost, izvrsna kovljivost te sposobnost hladnog valjanja u rastvorno žarenom stanju. U odnosu na druge glavni nedostatak

ovih legura je povišena gustoća zbog dodatka vanadija i kroma koji su teški metali više gustoće. Razvijene su brojne  $\beta$  legure, a najčešća je TiV12Cr11Al3 sastavljena od legura titana, vanadija, kroma i aluminijske te njeno glavno svojstvo je da ima visoku čvrstoću u toplinski očvrstnutom stanju [5].

### 4.3.3 $\alpha+\beta$ legure

$\alpha+\beta$  legure sastavljene su od jednog ili više  $\alpha$  stabilizirajućih elemenata i jednog ili više  $\beta$  elemenata. Postupkom homogenizacijskog žarenja i dozrijevanja ove legure mogu očvrstnuti i do 50%. Glavni dio proizvodnje titanovih legura predstavljaju  $\alpha+\beta$  legure. Legura titana, aluminijske i vanadijske (TiAl6V4) najčešća je od ovih legura i čini 45% proizvodnje titana i njegovih legura, titan čini 30%, a ostale legure su zastupljene 25% [5].

## 4.4 Berilij

Berilij je odličan element za legiranje s niklom, bakrom i željezom. Glavna prednost berilija je ista kao kod titana, a to je visoka otpornost na višim temperaturama. Najveća mana berilija je visoka nabavna cijena, ali usprkos tome koristi se u zrakoplovstvu [9]. Među lakim metalima berilij pokazuje najveći modul elastičnosti i najmanju gustoću. Za laki metal ima vrlo visoko talište od 1.390°C te je većinom dodatak legurama [10]. Slika 10 prikazuje kočnice zrakoplova gdje se primjenjuje berilij.



**Slika 10.** Prikaz kočnica zrakoplova

Izvor: [13]

## 4.5 Slitine na bazi aluminija

Laka slitina na bazi aluminija glavni je predstavnik lakih metala. Prema svom kemijskom sastavu definirana je kao „Al-Cu-Mg“, a u praksi je poznata pod nazivom „Dural“. Slitina na bazi aluminija sastavljena je od 92% do 95% aluminija dok su bakar, magneziji, mangan, silicij i cink prisutni manjim sadržajem. Otpornost ove slitine iznosi 40-45 N/mm<sup>2</sup>, a specifična težina iznosi 2.8. Prednosti ove slitine su relativno laka obrada, niska specifična težina, homogenost materijala, dovoljno velika otpornost, a nedostaci su niska otpornost na zamor, nepodobnost na autogeno zavarivanje i podložnost koroziji. Najveći nedostatak slitine na bazi magnezija je način spajanja pošto je spajanje autogenim zavarivanjem nedopustivo na mjestima jačeg opterećenja, pa se spajanje duralskih elemenata obavlja zakovicama istog materijala, točkastim varenjem ili direktnim međusobnim lijepljenjem specijalnim ljepljivima. Uz Dural postoje još brojne slitine na bazi aluminija, a to su: „Y-legure“, „Lautal“, „Pantal“, „Hidronalij“ te slitina aluminija, magnezija, bakra i cinka [9].

## 4.6 Slitine na bazi magnezija

Magnezij kao materijal sličan je aluminiju, ali je dosta lakši. Njegova primjena je vrlo raširena zbog niske težine te ga to čini zanimljivim konstrukcijskim materijalom. U

zrakoplovstvu najviše se koriste slitine s aluminijem i manganom. Naziv tih slitina je „Elektron“ te specifična težina im je svima ista te iznosi  $1,8 \text{ N/dm}^3$ . Njihova glavna prednost je niska specifična težina koja u kombinaciji s visokom otpornošću čini podobnim za izradbu slabije opterećenih dijelova. Uz ovu prednost postoje mnogi ozbiljni nedostaci poput korozije, veće cijene od aluminijevih slitina, opasnost od zapaljenja strojnih strugotina te otežane plastične obrade u hladnom stanju [9].

## 5. NEMETALI

U izradi zrakoplovne konstrukcije osim metala koriste se brojni materijali nemetalne vrste. Primjena tih materijala u zrakoplovstvu sve je veća jer obiluju brojnim dobrim karakteristikama poput dobrih fizičkih osobina, male mase te jeftine proizvodnje. U izradi zrakoplovne konstrukcije nemetali koji se koriste su drvo, bakelit, plastika, fiberglas, tekstolit, pleksi-staklo, staklo, stiropor i guma.

### 5.1.1 Drvo

Drvo je prvi konstrukcijski materijal korišten za izradu zrakoplova u povijesti. Drvo se lako i jeftino obrađuje, ima malu specifičnu težinu, visoko je otporno na zamor materijala te ima nisku nabavnu cijenu. Uz ove prednosti, drvo ima brojne nedostatke poput anizotropije odnosno različitih stanja u različitim smjerovima, organskih mana, podložan je utjecaju atmosferske vlage, nije dovoljno homogeno te ima nisku otpornost na smicanje. Osnovne vrste drveta su: liščari, četinari i strana egzotična finija drva. Elementi konstrukcije zrakoplova koji u izrađeni od drva isključivo se spajaju lijepljenjem, organskim ili sintetičkim [3]. Na slici 11 prikazana je elisa zrakoplova izrađena od drva.



**Slika 11.** Prikaz drvene elise zrakoplova

Izvor: [14]

### 5.1.2 Bakelit

Umjetna smola dobivena iz fenola, formalina i amonijaka mijenja agregatno stanje pri temperaturi od 160°C te postaje kruta i čvrsta naziva se bakelit. Bakelitskoj masi dodaje se drveno brašno i neki drugi dodaci kako bi se poboljšala mehanička otpornost. U izradi zrakoplovne konstrukcije koristi se za izradu drški, popuna te elektroopreme [9].

### 5.1.3 Plastika

Različiti umjetni i poluumjetni polimerski materijali nazivaju se plastikom. Čista plastika ima veću specifičnu težinu te jednaku čvrstoću kao drvo, a mnogo manju čvrstoću od aluminijevih legura. U izradi zrakoplovnih dijelova koristi se za elektroizolaciju zbog svoje otpornosti na djelovanje agresivnih sredstava te kao materijal za prozore [3]. Na slici 12 prikazani su prozori zrakoplova čiji su okviri napravljeni od plastike.



**Slika 12.** Prikaz plastičnih okvira prozora zrakoplova

Izvor: [15]

### 5.1.4 Fiberglas

Fiberglas je materijal sastavljen od više slojeva staklenih niti povezanih sintetskom smolom. Fiberglas je vrlo otporan, dobro se mehanički obrađuje, otporan je na koroziju i odličan je električni izolator. Spaja se lijepljenjem i zakivanjem, a koristi se za izradu ploča, oplata, pregradnih zidova, rubnika te raznih dijelova u elektroopremi [9].

### 5.1.5 Tekstolit

Tekstolit je armirani bakelit koji nastaje kada se slojevi tkanine impregniraju bakelitskom smjesom što ga čini žilavijim i otpornijim od čistog bakelita. Specifična težina mu je 1,3-1,4 N/m<sup>3</sup>. U zrakoplovstvu se koristi za izradu zupčanika za miran i bešuman rad agregata [9].

### 5.1.6 Pleksi staklo

Pleksi staklo je umjetno staklo nastalo polimerizacijom etera akrilne kiseline. Prednosti pred silikatnim staklom su te da ima manju specifičnu težinu, manju opasnost od krhotina pri lomu, bolju providnost, nezapaljivo je, lako se mehanički obrađuje i lijepi, otporno je na niskim temperaturama te na temperaturi od 100°C omekša i lako se oblikuje. U zrakoplovstvu se koristi pri izradi prozora [9]. Na slici 13 prikazana je primjena pleksi stakla na zrakoplovu.



**Slika 13.** Prozori na zrakoplovu izrađeni od pleksi stakla

Izvor: [16]

### 5.1.7 Staklo

Staklo je materijal koji nastaje taljenjem sirovine i brzim hlađenjem taline do velike viskoznosti u uvjetima da ne nastaje kristalizacija. Staklo je otporno na djelovanje vode, soli, kiselina, alkohola i drugih otapala što ga čini postojanim materijalom. Za vidljivi dio spektra

elektromagnetskog zračenja je proziran dok je za ostali dio spektra većinom nepropusan. Povećanjem debljine stakla smanjuje se udio propuštene svjetlosti. U zrakoplovstvu se koristi za proizvodnju staklenih vlakana te izradu prozorskih stakala [3]. Slika 14 Prikazuje kokpit izrađen od stakla.



**Slika 14.** Prikaz staklenog kokpita

Izvor: [17]

### **5.1.8 Stiropor**

Sintetički pjenasti materijal baziran na polistirenu naziva se stiropor. Tri glavna fizička svojstva stiropora su dobra zvučna izolacija, niska specifična težina te kvalitetna toplinska izolacija. Stiropor se lako obrađuje i lijepi. U zrakoplovstvu se koristi kao toplinska i zvučna izolacija te pri izradi „sendvič ploča“ kao materijal za ispunu [9]. Na slici 15 prikazana je primjena stiropora u zrakoplovu.



**Slika 15.** Prikaz izolacije zidova zrakoplova stiroporom

Izvor: [18]

### **5.1.9 Guma**

Guma je materijal koji nastaje od prirodnog kaučuka i ono predstavlja najelastičniji materijal u tehničkoj primjeni s mogućnošću izduženja od 500% prije loma. Glavne karakteristike su joj da je dobar elektroizolator i nepropusna je za fluide. Nedostatci su joj da je podložna utjecaju temperature, svjetla te starenju, a rastvara se u benzinu i mineralnim uljima. Svojstva gume je moguće poboljšati termičkom obradom dodavanjem sumpora, čađe i cinkovog oksida vulkanizacijom. U izradi zrakoplova koristi se kod izrade guma podvozja zrakoplova [9]. Na slici 16 prikazana je guma na kotačima zrakoplova.



**Slika 16.** Gume na kotačima zrakoplova

Izvor: [19]



## **6. KOMPOZITNI MATERIJALI**

Kompozitni materijali nastaju umjetnim spajanjem dvaju ili više različitih materijala s ciljem stvaranja materijala specifičnih svojstava kakva ne posjeduje nijedan materijal sam za sebe. Sastavljeni su većinom od dva materijala od kojih jedan čini matricu, a drugi ojačalo [20].

### **6.1 Matrica**

Zadatak materijala matrice je da podupire ojačala i drži ih zajedno, prenosi opterećenja između vlakana, složenoj komponenti daje njen oblik i određuje kvalitetu površine. Matrica kompozita može biti polimer, keramika, metali ili ugljik. Za kompozite u komercijalnim i visoko učinkovitim zrakoplovnim primjenama koriste se polimerne matrice. U okruženjima visoke temperature poput motora koriste se keramičke i metalne matrice, a u okruženjima ekstremnih temperatura poput kočnica i raketnih mlaznica koriste se ugljične matrice [20].

#### **6.1.1 Polimerne matrice**

Postoje tri podvrste kompozitnih polimernih matrica, a to su gumeni, termoplastični i termoset. Molekula sastavljena od ponavljajućih strukturnih jedinica povezanih kovalentnim kemijskim vezama naziva se polimer. Polimerne kompozitne matrice imaju svojstvo oduprijeti se atmosferskim i ostalim vrstama korozije, visoku otpornost na provođenje električne struje, nižu gustoću od metala i keramike [20].

#### **6.1.2 Metalna matrica**

Kompozitni materijali koji sadrže najmanje dva osnovna dijela poput metala i dodatnog materijala naziva se kompozitna metalna matrica, a matrica sastavljena od tri ili više sastavna materijala naziva se hibridnim kompozitom. U standardnoj primjeni matrica je sastavljena od lakših metala kao što su aluminiji, titan ili magneziji, a kod primjene pri visokim temperaturama koriste se matrice građene od kobalta i kobalta-nikla. Glavna svojstva kompozitnih metalnih matrica su otpornost na vatru, dobra električna i toplinska provodljivost, korištenje u širokom rasponu temperatura te ne asporbiraju vlagu [20].

### **6.1.3 Keramička matrica**

Kompoziti keramičke matrice sastavljena su od keramičkih vlakana koje materijal čine ojačan. Kompoziti keramičke matrice izrađeni su kako bi prevladali glavne nedostatke s kojim se susreće tradicionalna tehnička keramika, a to su krhkost, niska žilavost na lom te mala otpornost na termički udar [20].

## **6.2 Ojačalo**

Svrha ojačala u kompozitima je poboljšanje mehaničkih svojstava cijelog kompozita. Ojačala se pojavljuju u obliku čestica i vlakana te mogu biti strukturni kompoziti. Kompoziti mogu biti ojačani malim i velikim česticama, a vlakna mogu biti ugljična, staklena i aramidna [20].

### **6.2.1 Kompoziti pojačani česticama**

Postoje dvije vrste kompozita ojačanih česticama, a to su kompoziti ojačani velikim i malim česticama. Čestice po kojima se materijali označuju nisu uglavnom fizikalne dimenzije već mehanizam ojačanja. U odnosu na matricu imaju sposobnost poboljšati čvrstoću na lom kompozita te poboljšati krutost noseći teret opterećenja [20].

### **6.2.2 Kompoziti pojačani vlaknima**

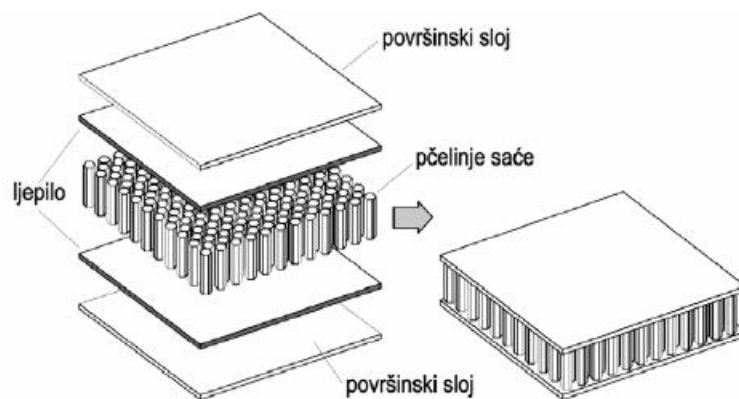
Kompoziti ojačani vlaknima sastoje se od matrice i ojačala većinom pojačanim vlaknima svojstava visoke čvrstoće i žilavosti. Za uporabu u zrakoplovstvu kompoziti ojačani vlaknima pogodni su zbog male težine, ograničenosti prema gorivosti te nezapaljivosti. Ugljična, staklena i aramidna vlakna imaju najbolja mehanička i fizička svojstva [20].

- Ugljična vlakna – najviše se koriste kod mehanički najopterećenijih dijelova zrakoplova te uglavnom se koriste vlakna napravljena iz poli-akrilonitril vlakana ili različitih smola nastalih procesom karbonizacije. Posjeduju brojna dobra svojstva poput dobre električne provodljivosti, visoke čvrstoće, visok modul elastičnosti.
- Staklena vlakna – proizvode se različitim postupcima od silike te uglavnom imaju slabija mehanička svojstva od ugljičnih vlakana, a zbog niže cijene koriste se kod mehanički manje opterećenih konstrukcija. Zbog svojih različitih svojstava označavaju se kao A-staklo, C-staklo, E-staklo, S-staklo.

- Aramidna vlakna - Aramid je polimerni aromatski armid, a posebno korišteni aramid je kevlar. Izrađen od lakih atoma, ali vrlo fleksibilan i jak, jednake težine te pet puta jači od čelika je kevlar. Molekule su mu spojene vodikovim vezama, a iz načina poravnanja polimernih lanaca dolazi njegova snaga. Ima sposobnost odupiranja abraziji, a jako je koristan na mjestima gdje se energija mora apsorbirati i raspršiti.

## 6.2 Strukturni kompoziti

Strukturni kompoziti dijele se u dva oblika, a to su laminatne (slojevite) i sendvič konstrukcije. Laminatne konstrukcije sastavljene su od laminatnih slojeva i smole. Paneli s različitom orijentacijom smjerova čine laminatne konstrukcije te su složeni i ljepljeni što ih čini materijalom više izotropne čvrstoće u ravnini. Primjer takvih konstrukcija su moderne skije i šperploča. Čvrsti i kruti listovi spojen na laganu jezgru strukturu čine sendvič konstrukciju, a čvrstoću na smicanje pruža oblik saće koja se koristi u zrakoplovnim konstrukcijama. Na slici 17 prikazan je primjer sendvič konstrukcije [20].



**Slika 17.** Sendvič konstrukcija

Izvor: [5]

Kompozitni materijali posjeduju brojne prednosti poput male gustoće i mase, otpornosti na koroziju, dugi vijek trajanja, dobar odnos čvrstoće i gustoće, povoljan odnos modula elastičnosti i gustoće, jeftino i jednostavno održavanje, mogućnost proizvodnje dijelova složenog oblika, mogućnost dizajniranja svojstava, neprovodnost, izdržljivost, otpornost na udare. Kompoziti imaju svoje nedostatke poput visoke cijene koju kompenzira dugotrajnost pa ga ne treba često zamjenjivati, oštećenja poslije udara koja nisu vidljiva na

površini, ali su moguća unutar materijala, mogućnost toplinskog oštećenja smole te u slučaju požara kompoziti ispuštaju otrovne plinove. Korištenjem kompozitnih materijala u izradi zrakoplovne konstrukcije moguće je značajno smanjiti težinu zrakoplova, povećati korisnu nosivost te time smanjiti potrošnju goriva odnosno povećati troškovnu isplativost zrakoplova [20]. Na slici 18 prikazan je trup zrakoplova izrađen od kompozitnih materijala.



**Slika 18.** Trup zrakoplova izrađen kompozitnih materijala

Izvor: [21]

## 7. ZAKLJUČAK

Pri izradi zrakoplovne konstrukcije potrebno je koristiti materijale specifičnih osobina, stoga je neophodno dobro poznavati njih i njihova svojstva, te odabrati optimalne za svaki dio zrakoplovne konstrukcije. U početku zrakoplovstva, za izradu zrakoplova koristili su se drvo i čelik kao osnovni materijali. Sve izraženijom upotrebom zrakoplova, uvidjelo se da treba napraviti dublju analizu svojstava poznatih materijala, te paralelno s tim, otkrivati i razvijati dotad nepoznate materijale. Proizvodnja novih materijala, poznavanjem njihovih značajki te načinom obrade, dovelo je do toga da danas u izradi zrakoplovne konstrukcije postoji čitav spektar metala, nemetala i kompozita. Tako danas, uz tradicionalne drvo i čelik, koristi se niz drugih materijala, koji svojim svojstvima omogućuju maksimalne rezultate u performansama te optimalan omjer cijene i troškova eksploatacije.

Kompozitni materijali su materijali nove generacije koji svojim svojstvima omogućavaju široku upotrebu u zrakoplovstvu, a uz tradicionalni čelik i njegove legure, metali koji zadovoljavaju brojne zahtjeve te se koriste za ključne dijelove zrakoplova su titan, nikl, slitine na bazi aluminijske i magnezijске te berilji. Brojni nemetali našli su svoje mjesto u zrakoplovnoj konstrukciji poput bakelita, plastike, fiberglasa, tekstolita, pleksi-stakla, stakla, stiropora i gume, a prvi povijesni osnovni materijal drvo, danas se uglavnom ne koristi zbog novih znatno boljih materijala u upotrebi. Zaključno prikazanim može se uočiti da su ljudi kroz povijest tražili i razvijali nove materijale zbog sve većih potreba i zahtjeva u zrakoplovstvu pa tako i u drugim industrijama te je nesumnjivo da će u budućnosti razviti neke nove materijale koji će posjedovati bolja svojstva te će zamijeniti današnje.

# LITERATURA

1. TimeToast. History of airplanes. Preuzeto s: <https://www.timetoast.com/timelines/history-of-airplanes> [Pristupljeno: 31.8.2022.]
2. Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to aerospace materials*. Elsevier. Preuzeto s: <https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/ADVANCED%20MATERIAL%20DESIGN/BUKU-2.pdf> [Pristupljeno: 5.5.2022.]
3. Valenta N. *Značajke materijala u zrakoplovnoj konstrukciji*. Završni rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, 2018. Preuzeto s: <https://dabar.srce.hr/islandora/object/fpz%3A1300> [Pristupljeno: 5.5.2022.]
4. Acorn welding. Importance of using the right materials in aircraft manufacturing. Preuzeto s: <https://www.acornwelding.com/blog/post/importance-using-right-materials-aircraft-manufacturing/> [Pristupljeno 12.5.2022.]
5. Ćorić D, Filetin T, *Materijali u zrakoplovstvu*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilište u Zagrebu, 2010./2011. Preuzeto s: <https://www.scribd.com/doc/64729283/Coric-Filetin-Materijali-u-Zrakoplovstvu> [Pristupljeno 12.5.2022.]
6. Pritamashutosh. *Introduction to aircraft materials*. Preuzeto s: <https://pritamashutosh.wordpress.com/2014/04/05/introduction-to-aircraft-materials/> [Pristupljeno 12.5.2022.]
7. Rexmetals. *Properties of metals used in aircraft*. Preuzeto s: <http://www.rexmetals.com/properties-of-metals-used-in-aircraft> [Pristupljeno 20.5.2022]
8. Flight mechanic. *Aircraft materials*. Preuzeto s: <https://www.flight-mechanic.com/aircraft-metals/> [Pristupljeno: 12.5.2022.]
9. Steiner S, Vidović A, Bajor I, Pita O, Štimac I, *Zrakoplovna prijevozna sredstva I*. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti Zagreb, Sveučilište u Zagrebu, 2008. Preuzeto s: <https://www.fpz.unizg.hr>, [Pristupljeno: 5.5.2022.]
10. Gabrić I, Šitić S, *Materijali I*. Split: Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilište u Splitu, , 2012.
11. Blazing Trails. *Anatomy of a Jet Engine: The Compressor Section*. Preuzeto s: <https://www.blazingtrails.info/post/anatomy-of-a-jet-engine-the-compressor-section> [Pristupljeno: 31.8.2022.]
12. New Atlas. *Flight of the Blackbird: The how, what and why of the incredible SR-71*. Preuzeto s: <https://newatlas.com/how-to-fly-sr-71-blackbird/46366/> [Pristupljeno:31.8.2022]

13. Engineering 360. *How do aircraft brakes work?*. Preuzeto s: <https://insights.globalspec.com/article/12903/how-do-aircraft-brakes-work> [Pristupljeno: 31.8.2022.]
14. Istock by getty images. *Wooden Propeller Pictures. Images and Stock Photos.* Preuzeto s: <https://www.istockphoto.com/photos/wooden-propeller> [Pristupljeno: 31.8.2022.]
15. Injection moulding world. *Plastics Paving Our Way To The Sky.* Preuzeto s: <https://injectionmouldingworld.com/plastics-paving-our-way-to-the-sky/> [Pristupljeno: 31.8.2022.]
16. The points guy, *What Are Airplane Windows Made of? (And What Is That Little Hole?)*. Preuzeto s: <https://thepointsguy.com/news/what-are-airplane-windows-made-of/> [Pristupljeno 31.8.2022.]
17. Wayback Machine. *Airbus A380 Australia Visit.* Preuzeto s: [https://web.archive.org/web/20101107042658/http://samchuiphotos.com/A380Sydney/A380\\_Australia\\_visit\\_November\\_2005.html](https://web.archive.org/web/20101107042658/http://samchuiphotos.com/A380Sydney/A380_Australia_visit_November_2005.html) [Pristupljeno:31.8.2022.]
18. ResearchGate. *Typical sidewall treatment of a large passenger transport aircraft* Preuzeto s: [https://www.researchgate.net/figure/Typical-sidewall-treatment-of-a-large-passenger-transport-aircraft\\_fig4\\_331912081](https://www.researchgate.net/figure/Typical-sidewall-treatment-of-a-large-passenger-transport-aircraft_fig4_331912081) [Pristupljeno:31.8.2022.]
19. Aircraft Nerds. *Aircraft parts: How are aircraft tires built?* Preuzeto s: <https://www.aircraftnerds.com/2019/01/how-are-aircraft-tires-built.html> [Pristupljeno:31.8.2022.]
20. Stančić T. *Primjena kompozitnih materijala u elementima konstrukcije zrakoplova.* Završi rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti 2019. Preuzeto s: <https://repozitorij.unizg.hr/islandora/object/fpz%3A1875/datastream/PDF/view> [Pristupljeno: 15.5.2022.]
21. Aviation Technology Directorate. *Research&Development: Composite materials technology.* Preuzeto sa: <https://www.aero.jaxa.jp/eng/research/basic/composite/> [Pristupljeno:31.8.2022.]

## POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz zrakoplova kojemu je osnovni materijal bilo drvo .....	2
Slika 2. Prikaz ovisnosti mehaničke otpornosti i gustoće različitih materijala .....	6
Slika 3. Prikaz ovisnosti modula elastičnosti o gustoći materijala .....	8
Slika 4. Dinamička izdržljivost metalnih materijala .....	10
Slika 5. Ponašanje materijala pri dinamičkom naprezanju .....	10
Slika 6. Način pojave pukotine .....	11
Slika 7. Usporedba specifične čvrstoće i specifične krutosti materijala .....	13
Slika 8. Prikaz plinske turbine zrakoplova izrađene od nikla .....	17
Slika 9. Prikaz nadzvučnog zrakoplova SR-71 Blackbird izrađenog uglavnom od titana.....	18
Slika 10. Prikaz kočnica zrakoplova .....	20
Slika 11. Prikaz drvene elise zrakoplova .....	22
Slika 12. Prikaz plastičnih okvira prozora zrakoplova.....	23
Slika 13. Prozori na zrakoplovu izrađeni od pleksi stakla .....	24
Slika 14. Prikaz staklenog kokpita .....	25
Slika 15. Prikaz izolacije zidova zrakoplova stiroporom .....	26
Slika 16. Gume na kotačima zrakoplova.....	26
Slika 17. Sendvič konstrukcija .....	29
Slika 18. Trup zrakoplova izrađen kompozitnih materijala .....	30



## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Gustoće konstrukcijskih legura .....	7
Tablica 2. Prikaz zastupljenosti oštećenja materijala u zrakoplovstvu .....	9

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 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 Materijali zrakoplovne konstrukcije, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

U Zagrebu,

Student:

Pavo Veselić

