Značajke materijala u zrakoplovnoj konstrukciji

Valenta, Nikolina

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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:119:323143

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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



Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Nikolina Valenta

ZNAČAJKE MATERIJALA U ZRAKOPLOVNOJ KONSTRUKCIJI

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 20. ožujka 2018.

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

ZAVRŠNI ZADATAK br. 4522

Pristupnik: **Nikolina Valenta (0130292867)**
Studij: Promet
Smjer: Zračni promet

Zadatak: **Značajke materijala u zrakoplovnoj konstrukciji**

Opis zadatka:

Napraviti pregled uvodnih postavki, definirati predmet istraživanja, svrhu i cilj istraživanja te ukratko prikazati kompoziciju rada.
Ukratko opisati kronologiju uporabe materijala koji su se koristili i koji se koriste u zrakoplovnoj konstrukciji.
Predočiti podjelu korištenih materijala te ukazati na prednosti i nedostatke svakog pojedinog materijala.
Na primjeru konkretnih zrakoplova, dati presjek korištenih materijala pri konstrukciji komponenti zrakoplova.
Izvesti konkretne zaključke o istraživanoj tematici i interpretirati rezultate istraživanja.

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Andrija Vidović

Predsjednik povjerenstva za završni ispit:

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

ZNAČAJKE MATERIJALA U ZRAKOPLOVNOJ KONSTRUKCIJI

CHARACTERISTICS OF MATERIALS IN AICRAFT CONSTRUCTION

Mentor: izv. prof. dr. sc. Andrija Vidović

Studentica: Nikolina Valenta
JMBAG: 0130292867

Zagreb, kolovoz 2018.

SAŽETAK

Od kako je čovjeka postoji želja za letom. Braća Wright bila su prva koja su 1903. tu želju i ostvarila. Tada prvi zrakoplov Flyer bio je jednostavne konstrukcije s osnovnim dijelovima izrađenim od tradicionalnim materijala poput drveta, čelika, lakih aluminijskih legura i kositra. Dolaskom ratova, Prvog i Drugog svjetskog rata, zrakoplovstvo je brzo napredovalo. Zrakoplovi su se prvenstveno koristili u vojne namjene. Razdoblja između ratova bila su prilika za poboljšanja i otkrivanja novih materijala za uporabu u zrakoplovnim konstrukcijama. Danas, kada zrakoplovstvo raste iz godine u godinu, i dalje se teži izradi što boljih, većih, lakših i bržih zrakoplova. Tome uvelike doprinose svi novi dostupni metali i nemetali. Ipak, od svih materijala najviše se svojim karakteristikama izdvajaju kompozitni materijali.

KLJUČNE RIJEČI: materijali; metali; nemetali, zrakoplov; konstrukcija

SUMMARY

Since there is man there is a desire to fly. Wright Brothers were the first to accomplish that wish in 1903. The first airplane Flyer had a simple construction with basic parts made of traditional materials such wood, steel, lightweight aluminium alloys and tin. With arrival of wars, First and Second World War, the aviation rapidly advanced. Airplanes were primary used for military purposes. The period between wars was the opportunity to improve and discover new materials for aircraft construction. Today, when aviation grows year after year, there is still need to construct better, bigger, lighter and faster airplane. New available metals and non-metals contribute greatly to this. However, of all available materials composite materials are used the most in new airplanes.

KEY WORDS: materials; metals; non-metals; airplane; construction

SADRŽAJ

1. UVOD ... 1
2. POVIJESNI PREGLED UPORABE MATERIJALA U KONSTRUKCIJI ZRAKOPLOVA ... 3
3. PREGLED KORIŠTENIH METALA U KONSTRUKCIJI ZRAKOPLOVA ... 8
   3.1. ČELIK ... 8
      3.1.1. OBIČNI UGLJIČNI ČELICI ... 9
         3.1.1.1. MEKŠI NISKOUGLJIČNI ČELIK ... 9
         3.1.1.2. SREDNJI UGLJIČNI ČELIK ... 10
         3.1.1.3. OTPORNIJI UGLJIČNI ČELIK ... 10
      3.1.2. LEGIRANI ČELICI ... 10
         3.1.2.1. MIKROLEGIRANI ČELICI ... 10
         3.1.2.2. NISKOLEGIRANI ČELICI ... 11
         3.1.2.3. LEGIRANI ČELICI ... 11
         3.1.2.4. VISOKOLEGIRANI ČELICI ... 11
   3.2. NIKL ... 11
   3.3. TITAN ... 12
      3.3.1. α LEGURE ... 14
      3.3.2. β LEGURE ... 14
      3.3.3. (α+β) LEGURE ... 14
   3.4. BERILIJ ... 14
   3.5. LAKE SLITINE ... 15
      3.5.1. SLITINE NA BAZI ALUMINIJA ... 16
      3.5.2. SLITINE NA BAZI MAGNEZIJA ... 17
4. PREGLED KORIŠTENIH NEMETALA U KONSTRUKCIJI ZRAKOPLOVA ... 18
   4.1. DRVO ... 18
   4.2. BAKELIT ... 19
   4.3. TEKSTOLIT ... 20
   4.4. PLASTIKA ... 20
   4.5. FIBERGLAS ... 21
   4.6. STIROPOR ... 22
   4.7. PLEKSI-GLAS ... 22
   4.8. STAKLO ... 23
   4.9. GUMA ... 24
   4.10. KOMPOZITNI MATERIJALI ... 25

5. IZBOR I USPOREDBA KORIŠTENIH MATERIJALA U KONSTRUKCIJI ZRAKOPLOVA 27
5.1. BOEING 787 DREAMLINER 27
5.2. AIRBUS 380 28
6. ZAKLJUČAK 30
LITERATURA 31
POPIS SLIKA 32
POPIS GRAFIKONA 32

1. UVOD

Prvi upravljani let zrakoplovom na motorni pogon bio je 17. prosinca 1903. godine, a izvela su ga braća Orville i Wilbur Wright. Svojim zrakoplovom Flyer, kojeg su sami izradili, preletjeli su 37 metara u 12 sekundi. Upravo ovaj događaj mnogi smatraju kao preteču za razvoj zrakoplovstva kakvo danas poznajemo. Od 1903. godine do danas puno se napredovalo, pogotovo u pogledu materijala. Zrakoplov Flyer bio je od tradicionalnih materijala: drva, čelika, lakih aluminijskih slitina i kositra. Dok su danas najmoderniji zrakoplovi izgrađeni većinom od kompozitnih materijala o kojima se tada ništa nije znalo. U razdoblju Prvog i Drugog svjetskog rata zrakoplovstvo se najviše i najbrže razvijalo. Danas, kada se zrakoplovi koriste primarno u svrhu putovanja i prijevoza tereta, ali naravno još uvijek i u vojne svrhe, sve više se teži smanjenju ukupnih troškova. Izbor materijala koji se koriste u zrakoplovnoj konstrukciji uvelike može tome doprinijeti. Zrakoplovi su zbog novih materijala sve lakši, brži, veći, troše manje goriva i imaju manje operativne troškove.

Predmet istraživanja završnog rada je prikazati povijesni razvoj zrakoplovstva, podjelu materijala koji se koriste u zrakoplovstvu na metale i nemetale te primjer izbora materijala na zrakoplovima Boeing 787 Dreamliner i Airbus 380. Svrha i cilj istraživanja je prikazati zašto se pojedini materijali koriste za pojedine dijelove zrakoplova te zašto su neki novi zamijenili tradicionalne, a kako to da su ipak neki još uvijek zbog svojih svojstava nezamjenjivi.

Rad je podijeljen u šest poglavlja, kako slijedi:

1. Uvod
2. Povijesni pregled uporabe materijala u konstrukciji zrakoplova
3. Pregled korištenih metala u konstrukciji zrakoplova
4. Pregled korištenih nemetala u konstrukciji zrakoplova
5. Izbor i usporedba korištenih materijala u konstrukciji zrakoplova
6. Zaključak

U prvom poglavlju, odnosno uvodu, definirani su predmet, svrha i cilj istraživanja te je predočena struktura rada.

Drugo poglavlje daje kronološki povijesni pregled materijala koji su se koristili i koji se koriste u zrakoplovnoj konstrukciji od prvog leta braće Wright preko Prvog i Drugog svjetskog rata do danas.

Treće poglavlje opisuje sve metale koji se koriste u izradi zrakoplovnih konstrukcija. Opisani su čelik, nikl, titan, berilij te slitina na bazi aluminija i magnezija. Za svaki metal navedene su prednosti i nedostatci te dijelovi zrakoplova gdje se najviše koriste na osnovu svojih svojstava.

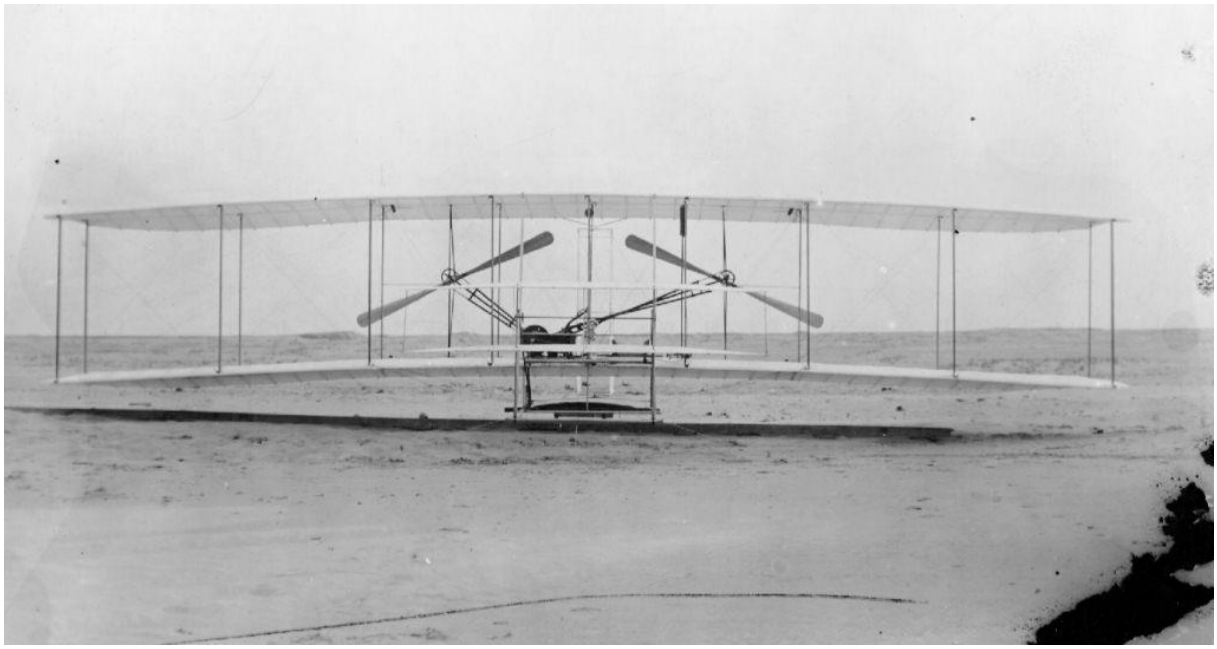
Četvrto poglavlje opisuje sve nemetale koji se koriste u izradi zrakoplovnih konstrukcija. Opisani su drvo, bakelit, teksolit, plastika, fiberglas, stiropor, pleksi-glas, staklo, guma i kompozitni materijali. Za svaki nemetal, od onih tradicionalnih do novih naprednih, navedene su prednosti i nedostatci te dijelovi zrakoplova gdje se najviše koriste.

Peto poglavlje na primjeru zrakoplova dva najveća proizvođača u svijetu i ujedno dva najveća konkurenta, Boeing 787 Dreamliner i Airbus 380, prikazuje presjek korištenih materijala na pojedinom zrakoplovu i poboljšanja koja su dobivena korištenjem novih materijala.

Šesto poglavlje, odnosno zaključak, donosi konkretne zaključke o istraživanoj tematici i interpretaciju rezultata istraživanja.

2. POVIJESNI PREGLED UPORABE MATERIJALA U KONSTRUKCIJI ZRAKOPLOVA

Od kad čovjek postoji, postoji i njegova želja za letom inspirirana letom ptica. Mnoge legende i mitovi iz daleke povijesti govore o pokušaju kraljeva, znanstvenika i umjetnika o tome da ostvare svoju želju za letom. Čast za prvi upravljani let zrakoplovom na motorni pogon izveden 17. prosinca 1903. godine pripala je braći Orvillu i Wilburu Wrightu. Preletjeli su 37 metara u 12 sekundi zrakoplovom imena Flyer. Slika 1. prikazuje zrakoplov Flyer koji su braća Wright izgradila od tradicionalnih materijala: drva (bijele omorike i jasena), čelika, lakih aluminijskih slitina (AlCu9) i kositra.[1]



Slika 1: Zrakoplov Flyer

Izvor: http://www.wright-brothers.org/Information_Desk/Just_the_Facts/Airplanes/Flyer_I.htm (11.04.2018.)

U vremenu prije Prvog svjetskog rata zrakoplovi su se počeli razmatrati kao potencijalno vojno oružje, a upravo su braća Wright 1908. godine demonstrirala letne karakteristike Flyera američkoj vojsci.[2] U Prvom svjetskom ratu zrakoplovi su imali drvenu strukturu koja je bila ojačana žicama, a krila i otplate bili su od platna, ali također ojačana žicama zbog lakše izdržljivosti dinamičkih opterećenja u letu. Mogli su letjeti

[1] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 5.
[2] Jurilj, J.: Avijacija i avion, Despot Infinitus d.o.o., Zagreb, 2014., str. 25.

tek sat, dva brzinom od oko 100 km/h, a nosivost je bila dovoljna tek za jednog pilota i jednog promatrača. Zrakoplovi su tijekom rata brzo napredovali, a pokretljivost, čvrstoća, mogućnost izvođenja oštrih manevara i izdržavanja oštećenja bitno su poboljšani. Nosiva rešetkasta struktura počela se izrađivati od čeličnih cijevi, a prednja otplata od aluminija i njegovih slitina zbog povećanja čvrstoće kako bi avion mogao izdržati dinamička opterećenja. Metalne strukture zamijenile su tradicionalno drvo kao glavni materijal. Također, u ovom razdoblju počeli su se izrađivati višekrilni zrakoplovi zbog svoje mogućnosti da generiraju veći uzgon zbog veće uzgonske površine, no mana višekrilnih zrakoplova je manja brzina. U razdoblju od 1914. godine do 1918. godine, koliko je trajao Prvi svjetski rat, vojno se zrakoplovstvo razvilo zavidnom brzinom. Više od 225.000 zrakoplova svih vrsta proizvedeno je za vrijeme rata, smatra se da bi za ovakvu brzinu razvoja u mirnodopskom razdoblju trebalo oko 20 godina.[3]

Razdoblje nakon Prvog svjetskog rata donosi ogroman višak zrakoplova koji su se koristili u vojnom zrakoplovstvu i više nemaju svoju svrhu. Zrakoplovi korišteni u vojne svrhe mogli su se kupiti za svega nekoliko stotina dolara, što govori koliko je zrakoplova bilo višak, ali i pilota koji su njima upravljali. U mirnodopskom razdoblju razvija se civilno zrakoplovstvo i putnički zračni prijevoz. Krajem 1919. godine uspostavlja se redovni putnički i poštanski promet.[4] Što se tiče materijala u civilnim zrakoplovima, metalne konstrukcije s mnogo jačim motorima i slobodno nosećim krilom potpuno su zamijenile drvene, uvedena je primjena metalnih elisa i uvlačenje stajnog trapa. Putnička kabina razvijena je tako da može prevoziti i putnike i teret.[5] Prvi let preko Atlantskog oceana obavljen je 20. svibnja 1927. godine, izveo ga je Charles Lindbergh u modificiranom poštanskom zrakoplovu na relaciji New York – Pariz. U samo šest mjeseci prilagodio je zrakoplov za ovaj pothvat, izvadio je sve što nije bilo nužno, zrakoplov nije imao radio, padobran, instrumentalnu ploču kao ni pokazivač goriva. Masa zrakoplova na kraju je iznosila 2.300 kg, od čega je pola otpalo na masu goriva koju je spremio između motora i pilotske kabine.[6] Ovo zlatno doba zrakoplovstva uvelike je definiralo ono što tek slijedi.

[3] Ibid., str.51.-53.
[4] Ibid., str.67.
[5] https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/ama_ch01.pdf (11.04.2018.)
[6] Jurilj, J.: Avijacija i avion, Despot Infinitus d.o.o., Zagreb, 2014., str. 81.

Razdoblje Drugog svjetskog rata donijelo je potvrdu zrakoplova kao vojnog oružja. U ovom periodu vrhunac je doživio razvoj propelerskog zrakoplova pogonjenog klipnim motorom. Uz radio navigaciju uvodi se i radarska navigacija što uz mogućnost izbacivanja sjedala dovodi do veće sigurnosti. Nove slitine od obojenih lakih metala i čelika doprinijele su čvrstoći i trajnosti konstrukcije zrakoplova. Uz ove slitine razvijaju se i magnezijeve lake slitine te nehrđajuće slitine čelika s niklom i kromom.[7] Neke od materijala ovoga vremena s poboljšanim karakteristikama susreće se i danas. Rešetkaste konstrukcije od okruglih čeličnih cijevi s djelomično žičanim zategama korištene su za trup zrakoplova, krila su bila od čeličnih rebara i duraluminijskih elemenata prevučena lanenim platnom.[8] Motori su bili od sivog lijeva ili od aluminijske slitine što je dovelo do reduciranja težine zrakoplova i boljeg dovođenja topline. Spremnici su izrađeni od aluminijskog lima koji je presvučen specijalnim omotačem od gume čija je glavna zadaća bila stezanje rupe nastale prošupljivanjem spremnika kako bi se onemogućilo jače curenje goriva. Poslije drugog svjetskog rata započinje razvoj civilnog zrakoplovstva. Neki od zrakoplova razvijenih u to vrijeme lete još i danas.[9]

Velikom napretku tijekom povijesti u pogledu razvoja zrakoplova uvelike su doprinijeli novi materijali. Zrakoplovna industrija teži poboljšanju postojećih materijala, ali i razvoju novih, a sve u svrhu većih brzina i bolje pokretljivosti. Dok god se nisu razvili novi materijali koji su mogli ostvariti navedeno dizajni mnogih zrakoplova ostajali su samo na papiru bez mogućnosti realizacije u stvarnosti. Razvoj zrakoplovstva za sobom povlači i razvoj materijala, ali i obrnuto.[10] Nakon Drugog svjetskog rata civilni zrakoplovi doživjeli su razna poboljšanja poput zaobljenih prozora i vrata kako bi se izbjegla kritična područja gdje bi se mogle pojaviti pukotine, krila su također doživjela poboljšanja u pogledu čvrstoće i tanje izrade što je doprinijelo letu na višim visinama. Kapacitet zrakoplova povećavao se kako bi omogućio prijevoz što većeg broja putnika što je dovelo do traženja lakših i jačih materijala. Jedan od takvih materijala bio je aluminij koji je korišten na krilima, površinama za kontrolu leta, podu kabine, itd.[11]

[7] Jurilj, J.: Avijacija i avion, Despot Infinitus d.o.o., Zagreb, 2014., str. 191.
[8] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 6.
[9] Ibid., str.7.
[10] Jurilj, J.: Avijacija i avion, Despot Infinitus d.o.o., Zagreb, 2014., str. 359.
[11] https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/ama_ch01.pdf (11.04.2018.)

U današnje vrijeme u izradi zrakoplova sve više se koriste novi materijali. Razlozi za kontinuirana istraživanja materijala su poboljšanja uporabnih karakteristika zrakoplova u pogledu veličine, težine, nosivosti, brzine, trajnosti i sigurnosti. Promjene uvjeta rada i zahtjeva koji se postavljaju na strojni dio ili element konstrukcije, kvarovi tijekom uporabe uzrokovani materijalom (deformacije, korozija, lomovi, prekomjerno trošenje), primjena novih zakona, propisa, normi i smanjenje troškova te postizanje bolje konkurentnosti također su neki od razloga za istraživanja materijala. Udio materijala u cijeni zrakoplova iznosi oko 60%, što samo po sebi objašnjava potrebu za poboljšanjem materijala. Kako zrakoplovstvo napreduje, tako se postrožavaju i zahtjevi za izradu zrakoplovnih dijelova koje tradicionalni materijali ne mogu ispuniti. Noviji materijali kao slitine aluminija, titana i magnezija, čelici te kompozitni materijali udovoljavaju sve kompleksnijim eksploatacijskim zahtjevima. Glavne prednosti novih materijala su smanjena masa, otpornost na koroziju, dobra otpornost i na niskim i na visokim temperaturama, dinamička otpornost, visoka čvrstoća, itd. Glavni zahtjevi koje svaki zrakoplovni materijal mora ispuniti su: visoka mehanička otpornost u uvjetima statičkog opterećenja, otpornost umoru, otpornost na naglo širenje pukotina, otpornost na koroziju, otpornost na gorenje, mehanička otpornost pri visokim temperaturama (otpornost na puzanje), zadovoljavajuća krutost, mala masa i apsorpcija buke i vibracija. Kod izbora materijala važnu ulogu ima i sposobnost materijala za obradu ili oblikovanje nekim tehnološkim postupkom, npr, rezljivost, toplinska obradivost, ljevljivost, itd. Raspoloživost i dostupnost materijala također ima veliki utjecaj kod izbora materijala, a u današnje vrijeme još na to utječe i recikličnost materijala.[12]

Svaki materijal, kako kroz povijest tako i danas, ima određena svojstva koja treba zadovoljiti da bi bio prikladan za korištenje u zrakoplovnoj konstrukciji. Sile opterećenja na zrakoplovnu konstrukciju uzrokuju da se elementi razvlače, stlačuju, 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),

[12] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 14.-15.

rastezljivost (sposobnost materijalan da se deformira bez pucanja) i krutost (obrnuti pojam od rastezljivosti).[13]

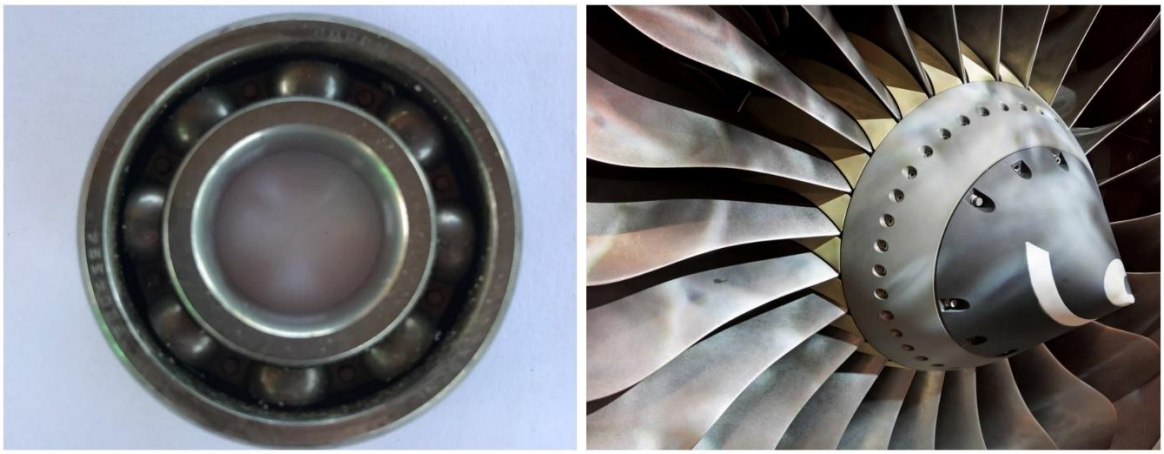
[13] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, FPZ, Zagreb, 2008., str. 140.

3. PREGLED KORIŠTENIH METALA U KONSTRUKCIJI ZRAKOPLOVA

Metali koji se koriste u izradi zrakoplovnih konstrukcija su: čelik, nikl, titan, berilij, slitine na bazi aluminija i slitine na bazi magnezija. Najviše se koriste za izradu trupa, krila i dijelova motora zrakoplova. Glavne prednosti izbora metala za zrakoplovnu konstrukciju su povoljna cijena i raspoloživost sirovina, mogućnost modificiranja svojstava i veliko iskustvo u radu s metalima.

3.1. ČELIK

Čelik se definira kao slitina željeza s ugljikom (2,06%). Opisuje se kao najotporniji, najizdržljiviji te najpouzdaniji element u zrakoplovnim konstrukcijama. Upravo zbog svojih glavnih svojstava čelik je nezamjenjiv materijal u konstrukciji zrakoplova. Najviše se koristi u izradi visokooptrećenih dijelova pouzdanih konstrukcija kao što su zupčanici, osovine helikoptera, nosivi sklop kotača, itd.[14] Slika 2. prikazuje čelik kao materijal i njegovu primjenu u izradi motora zrakoplova.



a) b)

Slika 2: a) Čelik kao materijal; b) Čelik u izradi motora zrakoplova

Izvor: a) autor; b) https://mmta.co.uk/2015/09/30/aeromaterials-past-present-and-future/ (25.05.2018.)

Čelik može biti četiri puta jači i tri puta tvrđi od aluminija, ali je i tri puta teži. Svoju ulogu još pronalazi u izradi opreme za slijetanje gdje su njegova svojstva od izrazite

[14] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 31.

važnosti.[15] Čelik po svojim svojstvima dijeli na dvije glavne vrste: obični ugljični čelici i legirani čelici. Ove dvije vrste prvotno su okarakterizirane udjelom ugljika u spojevima o kojem i ovise sve ostale osobine. S većim sadržajem ugljika linearno raste otpornost i tvrdoća, ali opada žilavost i plastičnost te materijal postaje krući.[16]

3.1.1. OBIČNI UGLJIČNI ČELICI

Glavni element običnog ugljičnog čelika je ugljik koji mu određuje glavne karakteristike kao što su otpornost, krutost, žilavost i uvjete termičke obrade. Otpornost čelika s većim postotkom ugljika pojačava se pomoći kaljenja, dok se čelici s manjim postotkom ugljika popravljaju postupkom „cementiranja“ koje uključuje otvrđivanje površine samog materijala. Za postupak cementriranja upotrebljavaju se čelici koji sadrže manje od 0,2% ugljika. Varenje čelika također je uvjetovano postotkom ugljika, on iznosi oko 0,3% odnosno izuzetno 0,35% ugljika.

Obični ugljični čelici uz ugljik sadrže još mnogo drugih elemenata, npr. silicij i mangan, u tragovima koji popravljaju njegove osnovne karakteristike. Dok silicij i mangan popravljaju karakteristike čelika, sumpor u toplom stanju i fosfor u hladnom stanju čine materijal krutim, iz tog razloga propisane su maksimalne granice sadržaja tih elemenata u čeliku.

U zrakoplovnim konstrukcijama primjenjuju se tri vrste običnih ugljičnih čelika: mekši niskougljični čelik, srednji ugljični čelik i otporniji ugljični čelik.

3.1.1.1. MEKŠI NISKOUGLJIČNI ČELIK

Mekši niskougljični čelik sadrži ispod 0,25% ugljika. Ima otpornost oko 40 N/mm^2 te osobine velike plastičnosti i pogodni su za plinsko varenje. Svoju uporabu najviše pronalaze u proizvodnji limova za izradu raznih okova, izradi dijelova uređaja, opreme, cijevi i zakovica.

[15] http://howthingsfly.si.edu/structures-materials/materials (13.04.2018.)
[16] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, FPZ, Zagreb, 2008., str. 147.

3.1.1.2. SREDNJI UGLJIČNI ČELIK

Srednji ugljični čelik sadrži od 0,3% do 0,4% ugljika. Ima otpornost od 50 N/mm^2 do 60 N/mm^2. Svoju uporabu ovaj tip čelika nalazi u izradi šipki, profila, vijaka, podloški, matica i klinova, a sve to za manje opterećene dijelove i elemente.

3.1.1.3. OTPORNIJI UGLJIČNI ČELIK

Otporniji ugljični čelik sadrži preko 0,4% ugljika. Ima otpornost od 60 N/mm^2 pa na više. Iako se najrjeđe koristi od svih vrsta čelika ipak je svoju uporabu pronašao u izradi zateznih žica, čeličnih kabela i drugih slabijih opruga manjeg značenja.[17]

3.1.2. LEGIRANI ČELICI

Legirani čelik nastaje tako da se u njega dodaju određeni kemijski elementi koji definiraju njegova svojstva. U ovim čelicima ugljik nije presudan za postizanje određenih svojstava. Svojstva variraju od mekanih do izuzetno čvrstih, otpornih na koroziju i visoke temperature.

Prema količini legiranih elemenata legirani čelici dijele se na: mikrolegirane čelike, niskolegirane čelike, legirane čelike i visokolegirane čelike.

3.1.2.1. MIKROLEGIRANI ČELICI

Mikrolegirani čelici ili sitnozrnasti čelici su u većini slučajeva čelici koji sadrže mangan u količini preko 1,5% te male količine drugih elemenata kao što su aluminij, bakar, niobij, vandanij, itd. Sadržaj ugljika u ovim spojevima je vrlo nizak što kao posljedicu ima to da se teško zakaljuje, također su otporniji na koroziju od običnih ugljičnih čelika. Prvenstveno se koriste za izradu zavarenih konstrukcija.[18] Spoj koji se koristi u zrakoplovnoj konstrukciji je npr. vanadij-čelik koji je vrlo skup, ali čeliku naročito poboljšava žilavost. Koristi se za izradu opruga i rad na povišenim temperaturama.[19]

---

[17] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, FPZ, Zagreb, 2008., str. 147.- 48.
[18] https://bib.irb.hr/datoteka/665498.MATERIJALI_1_skripta_listopad_2013.pdf (13.04.2018.)
[19] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, FPZ, Zagreb, 2008., str. 149.

3.1.2.2. NISKOLEGIRANI ČELICI

Niskolegirani čelici ili skaljeni poboljšani čelici su čelici koji su legirani kromom i molibdenom od oko 2% do 3% ukupno uz dodavanje manjih količina nikla, niobija i vanadija. Ovisno u udjelu ugljika mogu se dobiti metali visoke čvrstoće i tvrdoće. Koriste se za izradu strojnih dijelova te napregnutih konstrukcija. Skuplji su od ugljičnih čelika.[20] Spoj koji se koristi u zrakoplovnoj konstrukciji je npr. nikl-čelik koji je vrlo otporan na sve vrste udara i dinamičkih naprezanja, žilav, tvrd te pojačava otpornost na koroziju. Uz sve svoje osobine spada i u najskuplji legirajući element.[21]

3.1.2.3. LEGIRANI ČELICI

Legirani čelici sadrže od 5% do 10% legiranih elemenata kao što su krom, nikal, vanadij, niobij, titan, volfram i kobalt te povišeni sadržaj ugljika.[22] U zrakoplovnoj konstrukciji koristi se spoj krom nikl-volfram koji je jedna od najsloženijih slitina te se upravo zato koristi za izradu motora.[23]

3.1.2.4. VISOKOLEGIRANI ČELICI

Visokolegirani čelici legirani su kromom i niklom te manjim količinama ostalih elemenata. Visokolegirani čelici skuplji su od ugljičnih.[24] Jedna od vrsta ovog čelika koja se koristi u izradi zrakoplovnih materijala je i mangan-čelik. Mangan u čeliku povećava otpornost, tvrdoću, osobine kaljenja i sposobnost zavarivanja.[25]

3.2. NIKL

Nikl je preuzeo ulogu osnovnog materijala u suvremenim slitinama najvišeg stupnja vatrostalnosti od željeza te potpuno eliminirao njegovu ulogu. Talište nikla je na 1.450°C te se kristalizira u plošno centriranu kubnu rešetku. Ispod 360°C slabo je

[20] https://bib.irb.hr/datoteka/665498.MATERIJALI_1_skripta_listopad_2013.pdf (13.04.2018.)
[21] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, FPZ, Zagreb, 2008., str. 149.
[22] https://bib.irb.hr/datoteka/665498.MATERIJALI_1_skripta_listopad_2013.pdf (13.04.2018.)
[23] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, FPZ, Zagreb, 2008., str. 149.
[24] https://bib.irb.hr/datoteka/665498.MATERIJALI_1_skripta_listopad_2013.pdf (13.04.2018.)
[25] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, FPZ, Zagreb, 2008., str. 149.

magnetičan, zadržava čvrstoću i na 400°C, otporan je na oksidaciju i koroziju.[26] Niklove slitine upotrebljavaju se pri izradi termički i mehanički najopterećenijih dijelova plinskih turbina zbog izdržljivosti konstruktivnog materijala vatrostalnih kvaliteta. Slika 3. prikazuje nikl kao materijal te plinsku turbinu za čiju se izradu koristi.

Niklove superlegure razvijene su radi otpornosti na koroziju i mehaničke otpornosti pri visokim temperaturama. Supelegure nastale su kao odgovor na potražnju materijala koje izdržavaju sve više radne temperature.[27] Najpoznatiji američki materijali te vrste su „Hasteloj“ i „Inconel“ i engleski „Ni-monik 80“.[28] „Hasteloj“ je slitina nikla otporna na koroziju s dodatkom molibdena, kroma, kobalta, bakra, željeza, titana, mangana, cirkonija, volframa ili ugljika.[29] „Inconel“ je slitina koja sadrži 76% nikla, 16% kroma i 7% željeza.[30] „Ni-monik 80“ je legura nikla i kroma.



a) b)

Slika 3: a) Nikl kao materijal; b) Plinska turbina u čijoj je izradi korišten nikl

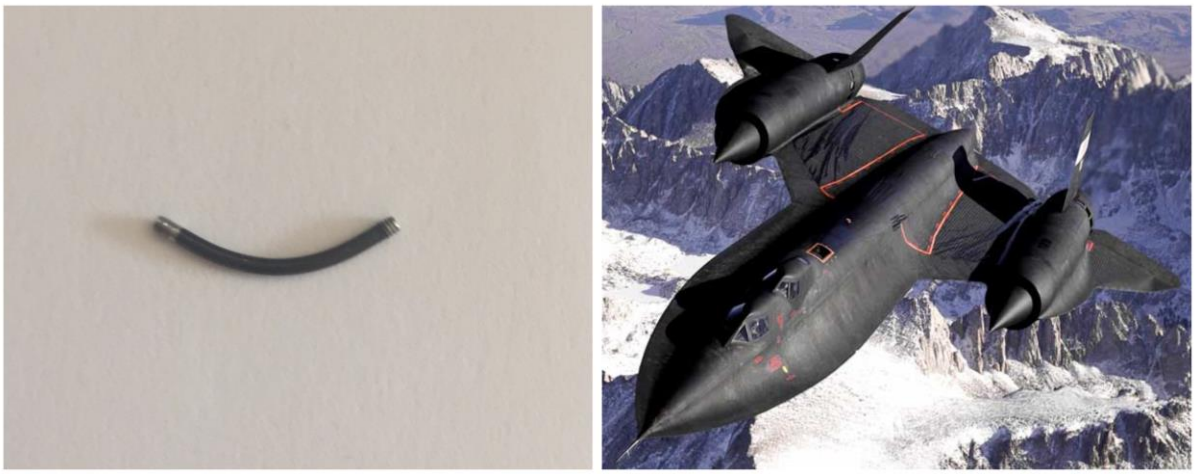
Izvor: a) autor; b) http://www.wisegeek.com/what-is-a-gas-turbine-engine.htm (03.06.2018.)

3.3. TITAN

Titan je polimorfni metal koji spada u suvremeni materijal koji je svoju ulogu u zrakoplovnim konstrukcijama pronašao tek u novije doba. Posjeduje pogodne i vrlo povoljnije konstruktivne osobine, uglavnom ima karakteristike čelika, ali s skoro za

[26] https://bib.irb.hr/datoteka/665498.MATERIJALI_1_skripta_listopad_2013.pdf (13.04.2018.)
[27] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 88.
[28] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, FPZ, Zagreb, 2008., str. 150.
[29] http://struna.ihjj.hr/naziv/hasteloj/5639/ (13.04.2018.)
[30] http://struna.ihjj.hr/naziv/inkonel/5638/#naziv (13.04.2018.)

polovinu nižom specifičnom težinom. U zrakoplovnim konstrukcijama upotrebljava se uglavnom legiran s elementima poput aluminija, mangana, vanadija, itd.[31] Titan i njegove legure koriste se zbog svoje visoke čvrstoće, niske gustoće, dobre žilavosti, male mase i odlične korozijske postojanosti pri niskim i povišenim temperaturama, no titan nije toplinski čvrst materijal. Može podnijeti temperature do 550°C, a čvrstoća mu je 120 N/mm^2 dok mu je gustoća od 4.500 kg/m^3. Titan se smatra isplativijim materijalom od čelika i nikla, no titan je skuplji od svih navedenih materijala, kao i sam materijal i troškovi obrade vrlo su visoki. Većinom se koristi za izradu dijelova koji su mehanički i toplinski opterećeni, kao npr. u izradi mlaznog motora gdje čine od 20% do 30% njegove mase. Može se koristiti i za izradu malih dijelova kao zatezača pa sve do nosača krila i trupa vojnih i putničkih zrakoplova. Slika 4. prikazuje titan kao materijal te vojni zrakoplov Lockhead SR-71 Blackbird čija su krila i trup u potpunosti izrađeni od titana. U današnje vrijeme primjena titana u zrakoplovnoj industriji sve je veća upravo zbog svoje male mase i velike pouzdanosti. Titanove legure koje nalaze primjenu u zrakoplovstvu dijele se na: α, β i (α+β) legure.



a) b)

Slika 4: a) Titan kao materijal; b) Zrakoplov Lockhead SR-71 Blackbird čiji su kril i trup izrađeni od titana

Izvor: a) autor; b) http://test2.fiddlersgreen.net/models/aircraft/Lockheed-SR71.html (03.06.2018.)

[31] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, FPZ, Zagreb, 2008., str. 150.

3.3.1. α LEGURE

Glavni stabilizatori α legure su ugljik, kisik, dušik, aluminij i kositar. Legure koje sadrže aluminij, kositar i cirkonij većinom se upotrebljavaju pri povišenim temperaturama od 370°C do 550°C. α legure otpornije su pri višim temperaturama od β i (α+β) legura iz razloga što su manje osjetljive na djelovanje kisika, dušika i ugljika, ali za razliku od β i (α+β) legura ove legure ne mogu očvrsnuti postupkom toplinske obrade. Najčešća od ovih legura je legura titana, aluminija i kositra (TiAl5Sn2,5) koja ima oksidacijsku i korozijsku postojanost i odlična svojstva pri niskim temperaturama te upravo zbog svojih dobrih svojstava nalazi svoju primjenu u zrakoplovnoj industriji.

3.3.2. β LEGURE

β legure su visoko prokaljive legure koje mogu postići visoku čvrstoću toplinskom obradom, osobito u hladno očvsnutom stanju. Osnovni nedostatak ovih legura u odnosu na druge je gustoća koja je povišena zbog dodatka kroma i vanadija koji su teški metali više gustoće. Prednosti β legura su visoka prokaljivost, izvrsna kovljivost i zavarljivost. Najčešća od ovih legura je legura titana, vanadija, kroma i aluminija (TiV13Cr11Al3) koja ima visoku čvrstoću u toplinski očvrsnutom stanju te se ova legura također se koristi u zrakoplovnoj industriji.

3.3.3. (α+β) LEGURE

(α+β) legure sastoje se od jednog ili više α legiranih elemenata i jednog ili više β stabilizatora. Ove legure mogu očvrsnuti postupkom homogenizacijskog žarenja i dozrijevanja. Predstavljaju glavni dio proizvodnje titanovih legura. Najčešća od ovih legura je legura titana, aluminija i vanadija (TiAl6V4) koja čini ukupno 45% proizvodnje titana i njegovih legura, ostale legure zastupljene su 25% dok titan čini 30% ukupne proizvodnje.[32]

3.4. BERILIJ

Berilij svojom bojom podsjeća na željezo. Odličan je element za legiranje željezom, niklom i bakrom. Termičkom obradom otpornost njegovih slitina može se povećati do

[32] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 74.-82.str.

150 N/mm^2. Isto kao i titan, berilij je vrlo otporan na visokim temperaturama, te je njegova mana visoka cijena, no ipak nalazi svoju uporabu u zrakoplovnim konstrukcijama.[33] Koristi se za izradu zrakoplova velikih brzina, letjelica i kočnica zrakoplova.[34] Slika 5. prikazuje berilij kao materijal i njegovu uporabu u izradi kočnica zrakoplova.



a) b)

Slika 5: a) Berilij kao materijal; b) Berilij u uporabi kod izrade kočnica zrakoplova

Izvor: a) http://pibau.dk/periodisk/beryllium.html (03.06.2018.); b) https://beryllium.com/uses-and-applications/transportation (03.06.2018.)

3.5. LAKE SLITINE

Aluminijske slitine su legure visoke čvrstoće i male gustoće, samim time njihovom upotrebom zrakoplovi postaju veći i lakši te mogu primati više putnika i isplativiji su. Razvoj lakih slitina, ali i drugih materijala, doprinijelo je brzini, nosivosti, veličini, težini, sigurnosti i trajnosti zrakoplova.[35] Ipak, aluminij se ne može koristiti kao materijal za izradu vanjskih dijelova zrakoplova zbog tendencije da se zagrijava kod zrakoplova koji imaju brzinu leta bržu od brzine zvuka.[36] Slika 6. prikazuje aluminij kao materijal i primjer dijela zrakoplova (krila) gdje se aluminij i njegove slitine koriste u izradi unutarnjih konstrukcija.

[33] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, FPZ, Zagreb, 2008., str. 150.-151.
[34] https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=591 (13.04.2018.)
[35] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 8.
[36] http://howthingsfly.si.edu/structures-materials/materials (20.04.2018.)



a) b)

Slika 6: a) Aluminij kao materijal; b) Prikaz krila gdje se aluminij koristi za izradu unutarnjih konstrukcija

Izvor: a) autor; b) https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12117 (25.05.2018.)

3.5.1. SLITINE NA BAZI ALUMINIJA

Ova slitina u sastavu ima od oko 92% do 95% aluminija, dok su bakar, mangan, magnezij, silicij i cink zastupljeni u puno manjem udjelu, još se naziva i „Dur-aluminij“ ili „Dural“. Specifična težina iznosi 2,8 N/m^3, dok specifična težini čistog aluminija iznosi 2,7 N/m^3. Otpornost je jednaka kao i otpornost običnog nelegiranog ugljičnog čelika, oko 40 – 45 N/mm^2. Dobre osobine ovih slitina su: homogenost materijala, niska specifična težina, dovoljno velika otpornost i relativno laka obrada. Nedostatci su: relativno niska otpornost na zamor, podložnost koroziji i nepodobnost za autogeno varenje. Najveći nedostatak je svakako nepodobnost za autogeno varenje, odnosno sami način spajanja. Spajanje autogenim zavarivanjem nedopustivo je na mjestima jačeg opterećenja zbog štetnog djelovanja kemijskog procesa koji nastaje u slitini pri temperaturi topljenja. Stoga se zavarivanje najčešće obavlja pomoću zakovica od istog materijala ili pomoću električnog odnosno točkastog varenje te direktnim međusobnim specijalnim ljepilima.

Osim „Durala“ kao glavnog predstavnika postoje i druge slitine. Slitina aluminija, bakra i nikla poznata pod imenom „Hidumin“ ili „Y-legure“ odlikuje se većom otpornošću prema temperaturnim promjenama i koroziji. Slitina aluminija i bakra poznata pod imenom „Lautal“ vrlo je pogodna za termičku obradu. Slitina aluminija,

magnezija i silicija poznata pod imenom „Pantal“ ili „Anticorodal“ otporna je na djelovanje morske slane vode te je sposobna za dobru obradu i zavarivanje. Slitina aluminija i magnezija poznata pod imenom „Hidronalij“ ili „Duranalij“ ima dobru čvrstoću i otpornost prema koroziji i morskoj slanoj vodi. Slitina aluminija, bakra, magnezija i cinka najotpornija je kategorija lakih aluminijevih slitina koja se primjenjuje za dijelove najvećeg opterećenja.[37]

3.5.2. SLITINE NA BAZI MAGNEZIJA

Magnezij je sličan element aluminiji, ali je dosta lakši od njega. Specifična težina iznosi mu 1,7 N/m^3 na temperaturi od 20°C. Upravo niska specifična težina slitine na bazi magnezija ili „Elektrona“ u kombinaciji sa prilično niskom otpornošću čini tu slitinu pogodnu za izradu slabije opterećenih dijelova zrakoplova. Nedostatci ove slitine su znatno veća cijena od legura na bazi aluminija, otežana plastična obrada u hladnom stanju, zapaljivost strojnih strugotina te velika podložnost koroziji i u običnoj slatkoj vodi i u slanoj morskoj vodi.[38]

[37] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, FPZ, Zagreb, 2008., str. 144.-146.
[38] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, FPZ, Zagreb, 2008., str. 146.-147.

4. PREGLED KORIŠTENIH NEMETALA U KONSTRUKCIJI ZRAKOPLOVA

Nemetali koji se koriste u izradi zrakoplovne konstrukcije su drvo, bakelit, teksolit, plastika, fiberglas, stiropor, pleksi-glas, staklo, guma i kompozitni materijali. Od drva kao prvog materijala u zrakoplovnim konstrukcijama sve do kompozitnih materijala kao najnaprednijih materijala nemetali se koriste kao osnovni konstrukcijski materijali čak i za vitalne dijelove zrakoplova. Svi ovi materijali odlikuju se niskom specifičnom težinom i jeftinom proizvodnjom.[39]

4.1. 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. No ipak nedovoljno je homogen, u različitim smjerovima ima različita svojstva (anizotropija), podložan je utjecaju atmosferske vlage, ima nisku otpornost na smicanje te organske mane (čvorovi, pukotine, uvijanja, crvotočine). Svi elementi zrakoplovne konstrukcije od drveta spajaju se izričito lijepljenjem, organskim ili sintetičkim.[40] Razlikuju se tri osnovne vrste drveta: lišćari, četinari i strana egzotična finija drva. U lišćare spada drvo bjelogorice. Mogu biti tvrdi (bukva, hrast, cer, brijest, grab, jasen, javor, orah, bagrem, trešnja, kruška, dud, lijeska, itd.) i meki (breza, lipa, topola, joha, divlji kesten, vrba, itd.). Ova vrsta drveta svoju upotrebu nalazi u izradi elisa. U četinare spada drvo crnogorice, kao npr. bor, ariš, jela, smreka, tisa, čempres, itd. Strana egzotična finija drva su mahagonij, cedar, ebanovina, palisander, itd.[41] Slika 7. prikazuje drvo kao materijal te zrakoplov Mosquito iz Drugog svjetskog rata čija je unutarnja konstrukcija krila bila izrađena od drveta.

[39] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, FPZ, Zagreb, 2008., str. 151.
[40] Ibid., str. 142.
[41] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 133.



a) b)

Slika 7: a) Drvo kao materijal; b) Zrakoplov Mosquito čija je unutarnja konstrukcija od drva

Izvor: a) autor; b) https://www.heraldnet.com/news/wooden-wwii-airplane-to-soar-again-at-flying-heritage-collection/ (25.05.2018.)

4.2. BAKELIT

Bakelit je umjetna smola dobivena iz fenola, formalina i amonijaka. Pri temperaturi od 160°C mijenja agregatno stanje i postaje kruta i čvrsta. Kako bi bakelit postao otporniji dodaje mu se drveno brašno ili drugi dodatci. U zrakoplovnim konstrukcijama koristi se za izradu drški, popune i elektroopreme. Slika 8. prikazuje bakelit kao materijal i njegovu primjenu u izradi elektroopreme zrakoplova.



a) b)

Slika 8: a) Bakelit kao materijal; b) Primjena bakelita u izradi elektroopreme

Izvor: a) autor; b) https://www.pinterest.com/pin/183310647303269120/ (25.05.2018.)

4.3. TEKSTOLIT

Tekstolit ili armirani bakelit nastaje tako da se slojevi tkanine impregniraju bakelitskom smjesom. Otporniji je i žilaviji od čistog bakelita. Specifična težina iznosi mu od 1,3 N/m^3 do 1,4 N/m^3. U zrakoplovnoj konstrukciji koristi se za izradu zupčanika za agregate. Slika 9. prikazuje tekstolit kao materijal i postupak izrade dijelova od tekstolita.



a) b)

Slika 9: a) Tekstolit kao materijal; b) Prikaz izrade dijelova od tekstolita

Izvor: a) autor, b) http://www.audioplex.pl/oferta/tekstolit-tcf.html (25.05.2018.)

4.4. PLASTIKA

Plastika je zajednički naziv za različite umjetne ili poluumjetne polimerske materijale. Čisti plastični materijal ima čvrstoću kao drvo, specifična težina mu iznosi 1,0 N/m^3 što je veće od specifične težine drveta, a čvrstoća ovog materijala mnogo je manja od čvrstoće aluminijevih legura. Svoju primjenu u izradi zrakoplovnih konstrukcija nalazi najviše kao materijal za prozore ili elektroizolaciju zbog svoje otpornosti na djelovanje agresivnih sredstava poput kiselina, lužina, ulja, itd. Slika 10. prikazuje plastiku kao materijal i unutrašnjost putničke kabine i okvire prozora koji su izgrađeni od plastike.



a) b)

Slika 10: a) Plastika kao materijal; b) Okviri prozora izrađeni od plastike

Izvor: a) autor; b) https://psoriasisguru.com/airplane-interior-plastic-parts/ (25.05.2018.)

4.5. FIBERGLAS

Fiberglas je složeni materijal od staklenih niti iz više slojeva međusobno povezanih (lijepljenim) sintetskom smolom. Vrlo je otporan i pogodan za mehaničku obradu lijepljenjem i zakivanjem. Specifična težina mu iznosi od 1,5 N/m^3 do 1,9 N/m^3, otporan je na koroziju, ali upija vodu i u mokrom stanju smanjuje mu se otpornost. Svoju primjenu u izradu zrakoplovnih konstrukcija nalazi u izradi oplata, ploča, pregradnih zidova, rubnika, kutija i dijelova u električnoj opremi. Slika 11. prikazuje fiberglas kao materijal i njegovu primjenu u izradi zakrilca zrakoplova.



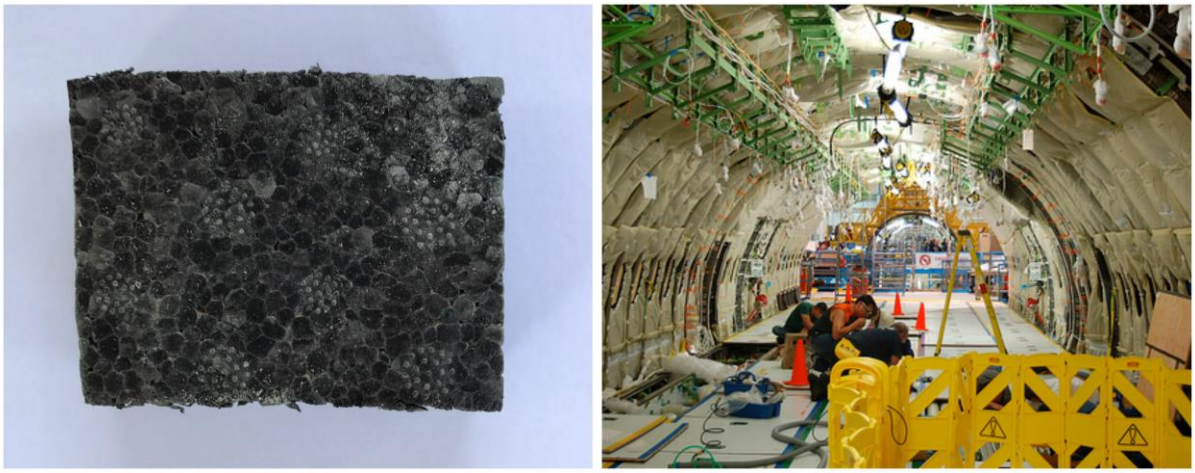
a) b)

Slika 11: a) Fiberglas kao materijal; b) Fiberglas u izradi zakrilca zrakoplova

Izvor: a) autor; b) http://www.planespottingberlin.com/tag/swiss-777/ (03.06.2018.)

4.6. STIROPOR

Stiropor je sintetički pjenasti materijal na bazi polistirena. Ima iznimno nisku specifičnu težinu od oko 0,016 N/m^3 do 0,025 N/m^3, odličnu kvalitetu toplinske izolacije te dobre osobine zvučne izolacije, mehanička otpornost mu je zanemariva te se lako obrađuje i lijepi. Svoju primjenu u zrakoplovnim konstrukcijama nalazi u toplinskoj i zvučnoj izolaciji te kao ispun pri izradi „sendvič-ploča“ gdje služi kao materijal za prostorno podupiranje i stabilizaciju razmaka među pločama. Slika 12. prikazuje stiropor kao materijal i njegovu primjenu u izolaciji zrakoplova.



a) b)

Slika 12: a) Stiropor kao materijal; b) Primjena stiropora u izradi izolacije zrakoplova

Izvor: a) autor; b) http://www.airliners.net/forum/viewtopic.php?t=760221 (25.05.2018.)

4.7. PLEKSI-GLAS

Pleksi-glas ili „akrilat“ odnosno umjetno staklo dobiveno je polimerizacijom etera akrilne kiseline. Ima manju specifičnu težinu od silikatnog stakla te manju opasnost od krhotina pri lomu, nezapaljiv je, ima dobru provodnost, otporan je na niskim temperaturama, lako se mehanički obrađuje i lijepi, na temperaturi od 100°C se omekša te se može oblikovati kalupima u različite oblike, po površini je nešto mekši te se ogrebotine koje nastanu mogu popraviti poliranjem.[42] U zrakoplovima se koristi kod izrade prozora što je prikazano slikom 13.

[42] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, FPZ, Zagreb, 2008., str. 151.-152.



a) b)

Slika 13: a) Pleksi-glas kao materijal; b) Pleksiglas u izradi prozora zrakoplova

Izvor: a) autor; b) http://www.totalplastics.com/products/611 (25.05.2018.)

4.8. STAKLO

Staklo je anorganska i amorfna prozirna tvar koja se dobiva taljenjem sirovina i brzim hlađenjem taline do velike viskoznost u uvjetima u kojima ne nastaje kristalizacija. Glavna prednost stakla je prozirnost za vidljivi dio spektra elektromagnetskog zračenja, dok je za ostali dio spektra uglavnom nepropusno. Kako se povećava debljina stakla smanjuje se udjel propuštene svjetlosti.

Staklo je vrlo postojan materijal, otporan na djelovanje vode, kiselina, soli, alkohola i drugih otapala. U zrakoplovnim kontrakcijama koristi se za izradu prozorskog stakla i za proizvodnju staklenih vlakana.[43] Slika 14. prikazuje staklo kao materijal i pilotsku kabinu čiji su dijelovi izrađeni od stakla.

[43] http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=57714 (15.05.2018.)



a) b)

Slika 14: a) Staklo kao materijal; b) Pilotska kabina čiji su dijelovi izrađeni od stakla

Izvor: a) autor; b) http://www.cap-ny153.org/aircraftinstrumentation.htm (03.06.2018.)

4.9. GUMA

Guma je materijal proizveden iz prirodnog kaučuka ili sintetskih sirovina. Može se proizvesti i iz umjetnog kaučuka kao što je „Perbunan“ ili „Buna S“. Od svih materijala koji se koriste u tehničke svrhe guma je najelastičniji materijal koji postiže izduženje od 500% prije loma.

Guma je podložna starenju te utjecaju temperature i svjetla. Rastvara se u benzinu i mineralnim uljima. Dodavanjem sumpora, cinkovog oksida i čađe te tehničkom obradom, odnosno vulkanizacijom, mogu se popraviti njezina loša svojstva.

Svoju uporabu u zrakoplovnim konstrukcijama nalazi kod izrade guma za podvozja zrakoplova.[44] Slika 15. prikazuje gumu kao materijal te njezinu primjenu u izradi zrakoplova.

[44] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, FPZ, Zagreb, 2008., str. 151.-152.



a) b)

Slika 15: a) Guma kao materijal; b) Gume na kotačima podvozja zrakoplova

Izvor: a) autor; b) https://www.planespotters.in/2012/11/about-aircraft-tire.html (25.05.2018.)

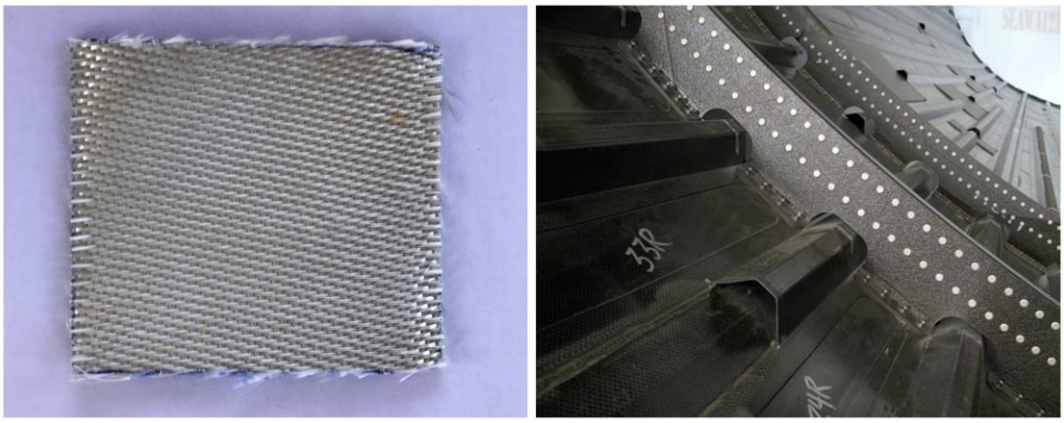
4.10. KOMPOZITNI MATERIJALI

Kompozitni materijali su najnapredniji materijali koji se koriste u izradi zrakoplovnih konstrukcija. To su tvorevine dobivene umjetnim spajanjem dvaju ili više različitih materijala s ciljem postizanja specifičnih karakteristike i svojstava kakva ne posjeduje ni jedan od tih materijala sam za sebe. Kompozitni materijali otporniji su na koroziju, imaju malu gustoću i malu masu, povoljan odnos čvrstoće i gustoće te modula elastičnosti i gustoće, mogućnost proizvodnje dijelova složenog oblika, jednostavno i jeftino održavanje, dulji vijek trajanja, mogućnost određivanja svojstava prilikom izbora materijala koji će se spajati. Zbog svoje niske gustoće, visoke čvrstoće i krutosti svoju primjenu često pronalaze u zrakoplovnim konstrukcijama. Slika 16. prikazuje kompozitni materijal i njegovu primjenu.

Kompozitni materijali značajno smanjuju težinu zrakoplova te samim time i potrošnju goriva i korisnu nosivost što sve dovodi do veće isplativosti. Upravo zbog svih ovih svojstava kompozitni materijali imaju prednost kod izrade oplata krila i trupa zrakoplova nad tradicionalnim materijalima.

Svaki kompozitni materijal sadrži ojačalo i matricu. Osnovna zadaća matrice je povezivanje ojačala, prijenos opterećenja na ojačala i njihova zaštita od površinskog oštećenja. Matrica može biti polimerna (polimerni kompozit – PMC), metalna (metalni kompozit – MMC) i keramička (keramički kompozit – CMC). Prema obliku ojačala

razlikuju se kompoziti s česticama, vlaknima ojačani kompoziti, slojeviti kompoziti i kompozitni sendviči.[45]

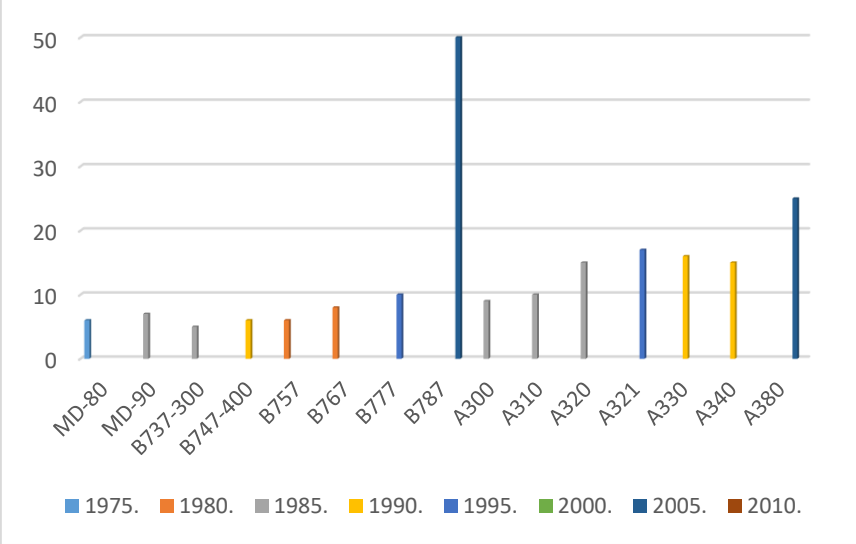


a) b)

Slika 16: a) Kompozitni materijal kao materijal; b) Izrada trupa zrakoplova od kompozitnih materijala

Izvor: a) autor; b) https://harpers.org/blog/2013/07/boeings-plastic-planes/ (25.05.2018.)

Grafikon 1. prikazuje povećanje uporabe kompozitnih materijala u zrakoplovnim konstrukcijama tijekom godina. Kompozitni materijali pokazali su se kao dobar izbor za izradu zrakoplova zbog svog doprinosa isplativosti. Njihovom upotrebom smanjuje se konstruktivna težina zrakoplova, potrošnja goriva, operativni troškovi, a povećava se plaćeni teret i letne performanse zrakoplova.



Grafikon 1: Udio kompozitnih materijala (%) u zrakoplovu prema godinama

Izvor: http://www.ncl.ac.uk/newrail/assets/docs/FinalReport-Aerospace.pdf (25.05.2018.)

[45] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010., str. 112.-114.

5. IZBOR I USPOREDBA KORIŠTENIH MATERIJALA U KONSTRUKCIJI ZRAKOPLOVA

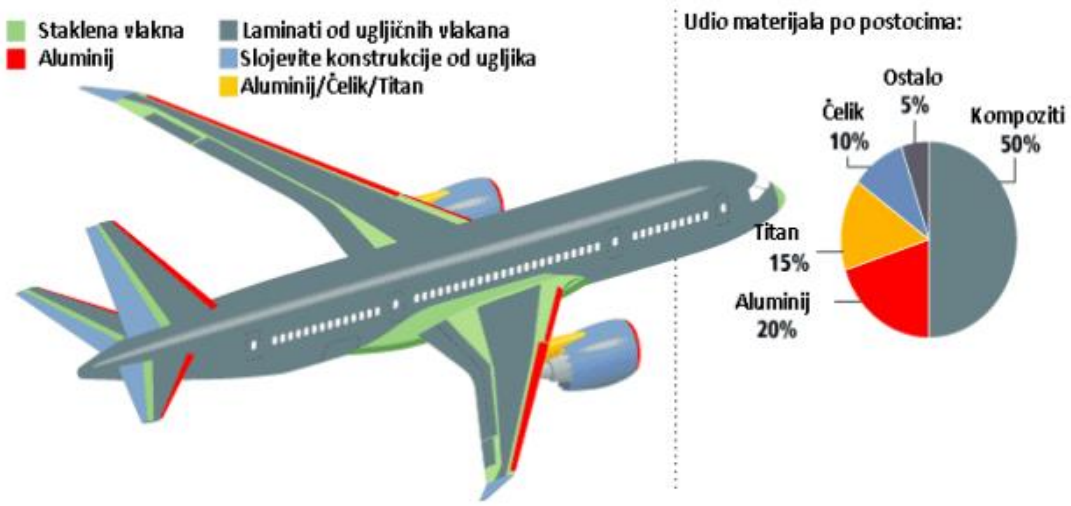
Proizvođači zrakoplova oduvijek se natječu u izradi boljih, većih, bržih, ali i povoljnijih zrakoplova. Inovacije u pogledu materijala koje mogu izabrati za zrakoplovne konstrukcije uvelike im pomažu u napretku u izradi zrakoplova. U današnje vrijeme s lakom dostupnošću čelika, aluminija, titana ili pak kompozitnih materijala lakše je izraditi lagan i brz zrakoplov, što se u prošlosti činilo ne baš lako zadatkom dok je primarni materijal za izradu konstrukcije bilo drvo. Američka tvrtka Boeing i francuska tvrtka Airbus S.A.S. dva su najveća konkurenta u polju proizvodnje zrakoplova. Od samih početaka poslovanja traje njihovo međusobno nadmetanje. Zrakoplovi Boeing 787 Dreamliner i Airbus 380 jedni su od najnovijih zrakoplova na tržištu. Oba zrakoplova predstavljaju značajan napredak u području izrade zrakoplova.

5.1. BOEING 787 DREAMLINER

Boeing 787 Dreamliner širokotrupni je zrakoplov s dva motora te dugim doletom. Prvi let bio mu je 15. prosinca 2009. godine, a u komercijalnu upotrebu došao je 2011. godine. U Boeing 787 obitelj spadaju zrakoplovi 787-8, 787-9 i 787-10. Upravo je upotreba kompozitnih materijala u izradi trupa, krila, repa te vrata donijela ovom zrakoplovu titulu najekonomičnijeg zrakoplova do sada. Kompozitni materijali su također doprinijeli aerodinamičnosti zrakoplova. Smanjena je potrošnja goriva (20% manja u odnosu na prethodne zrakoplove), troškovi održavanja (30% manji u odnosu na prethodne zrakoplove) te svi operativni troškovi (15% manji u odnosu na prethodne zrakoplove). Poboljšana je brzina krstarenja, prihodi od prijevoza tereta te udobnost putnika.

Slika 17. prikazuje raspored korištenih materijala zrakoplova Boeing 787 Dreamliner. Izbor materijala zahtjeva dugotrajnu analizu svakog pojedinog dijela zrakoplova kako bi se došlo do najboljeg rješenja. Materijali koji su korišteni u izradi zrakoplovne konstrukcije Boeinga 787 su prvenstveno kompozitni materijali, aluminij, čelik i titan. Kompozitni materijali čine čak 50% težine ovog zrakoplova i oni su primarni materijal koji se koristio za njegovu izradu. Kompozitni materijali dobro podnose zatezna opterećenja, ali su osjetljivi na kompresiju te se zbog toga upotrebljavaju za izradu trupa. Zbog njihove uporabe dobivena je relativno lagana i jednostavna struktura, ne

korodiraju i nisu skloni zamoru. Još jedna prednost ovih materijala je lakoća i brzina popravka kod eventualnih oštećenja. Drugi po redu po zastupljenosti je aluminij s 20%. Aluminij je kao materijal osjetljiv na zatezna opterećenja, ali dobro podnosi kompresiju. Kod Boeinga 787 dijelovi motora i krila izrađeni su od aluminija. Treći po redu je titan s 15% zastupljenosti. Titan može bolje izdržati opterećenja nego aluminij te je manje podložan zamoru i otporan je na koroziju. Koristi se za pričvršćivanje motora za krilo. Čelik se primjenjuje 10% i to za izradu dijelova krila i motora.[46]



Slika 17: Zrakoplov Boeing 787 Dreamliner

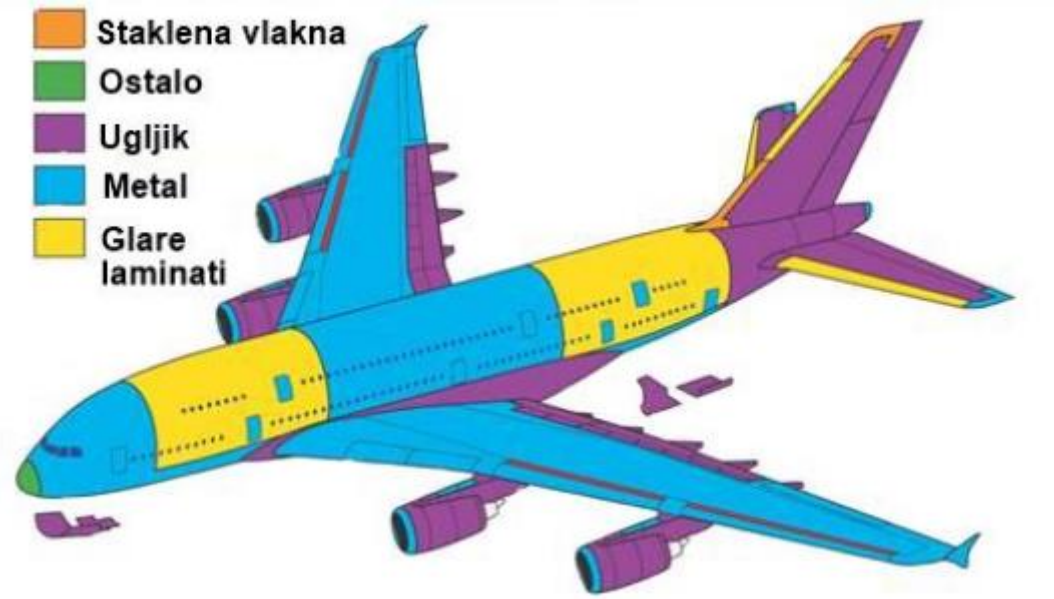
Izvor: http://www.appropedia.org/images/d/d7/Composites01.jpg (25.05.2018.)

5.2. AIRBUS 380

Airbus 380 je širokotrupni zrakoplov s dvije palube, četiri motora te dugim doletom. Prvi let bio mu je 27. travnja 2005. godine, a u upotrebu je došao 27. listopada 2007. godine. Ovaj zrakoplov najveći je zrakoplov današnjice. Zbog uporabe kompozitnih materijala cijena leta mu je manja za oko 15% u odnosu na konkurenciju. Airbus A380 nosi titulu jednog od najudobnijih zrakoplova za duga putovanja. U fazi izgradnje je i novi A380plus koji bi trebao nadomjestiti eventualne nedostatke svoga prethodnika.

[46] http://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#/advanced-composite-use (25.05.2018.)

Slika 18. prikazuje primjenu materijala u izradi konstrukcije zrakoplova A380. Udio kompozitnih materijala nešto je manji nego kod Boeing-ovog 787 Dreamlinera i iznosi 25%. Korišteni su za izradu dijelova trupa (prednji i stražnji dio). Novi kompozitni materijal koji je upotrebljavan za izradu ovog zrakoplova je Glare laminat. To je laminat od aluminijskih slitina i ljepila ojačan armiranim staklenim vlaknima. Ugljik se koristio za izradu motora te dijelova krila i spajanje istih za trup. Metal je korišten za izradu krila te nosa i srednjeg dijela trupa.[47]



Slika 18: Zrakoplov A380

Izvor: https://www.coursehero.com/file/p4rgj0j0/Autoclave-Used-to-Cure-Composites-After-Layup-Difficult-to-Detect-Repair-Damage/ (25.05.2018.)

[47] http://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a380-family.html#moreefficient (25.05.2018.)

6. ZAKLJUČAK

Utjecaj materijala jako je vidljiv u izradi zrakoplovnih konstrukcija. Ukoliko je analiza za izbor materijala koji će se koristi u pojedinom dijelu zrakoplova dobro obavljena, materijali mogu uvelike doprinijeti poboljšanju performansi zrakoplova. U odnosu na tradicionalne materijale današnji materijali doprinose aerodinamičnosti zrakoplova, smanjenoj potrošnji goriva, nižim troškovima održavanja i operativnim troškovima, poboljšanoj brzini krstarenja.

Zrakoplovni proizvođači natječu se tko će proizvesti isplativiji zrakoplov. Dva glavna proizvođača zrakoplova, Airbus i Boeing, imaju dva zrakoplova na trenutnom tržištu izrađena većinom od kompozitnih materijala, Boeing 787 Dreamliner i Airbus 380.

Ipak, i uz nove napredne kompozitne materijale, neki tradicionalni materijali i dalje se koriste. Čelik, titan, aluminij i dalje su u velikoj primjeni zbog svojih dobrih svojstava, dok je drvo potpuno zamijenjeno novim materijalima.

Znanstvenici, istraživači i inženjeri konstantno rade na unaprjeđivanju postojećih materijala ili kombiniranju istih te stvaranju novih kako bi dobili što bolji materijal za određeni dio zrakoplova. Za pojedini dio zrakoplova potreban je određeni materijal. 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 težini zrakoplova.

U ljudskoj prirodi je da uvijek teže boljem, pa tako još od braće Wright i njihovog zrakoplova Flyer, preko Prvog i Drugog svjetskog rata, zrakoplovstvo se razvija velikom brzinom. Stalne inovacije u ovom području su svakodnevnica. S sve većim zahtjevima moraju se nositi i materijali. Da bi zadovoljili nove standarde koji se postavljaju iz dana u dan potrebne su konstantne analize, istraživanja i poboljšanja.

Drvo, koje je bilo dobro u početcima zrakoplovstva, više ne može podnijeti brzine koje su danas standard, te broj putnika koji putuje zrakoplovima. Samim time pronađeni su materijali koji su uspjeli zamijeniti tradicionalne. No, u budućnosti će se sigurno morati pronaći neki novi materijali kako bi udovoljili sve većim zahtjevima.

LITERATURA

1. Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2010
2. Jurilj, J.: Avijacija i avion, Despot Infinitus d.o.o., Zagreb, 2014.,
3. Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, FPZ, Zagreb, 2008.,
4. https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/ama_ch01.pdf (11.04.2018.)
5. http://howthingsfly.si.edu/structures-materials/materials (13.04.2018.)
6. https://bib.irb.hr/datoteka/665498.MATERIJALI_1_skripta_listopad_2013.pdf (13.04.2018.)
7. http://struna.ihjj.hr/naziv/hasteloj/5639/ (13.04.2018.)
8. http://struna.ihjj.hr/naziv/inkonel/5638/#naziv (13.04.2018.)
9. https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=591 (13.04.2018.)
10. http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=57714 (15.05.2018.)
11. http://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#/advanced-composite-use (25.05.2018.)
12. http://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a380-family.html#moreefficient (25.05.2018.)

POPIS SLIKA

Slika 1: Zrakoplov Flyer 3
Slika 2: a) Čelik kao materijal; b) Čelik u izradi motora zrakoplova 8
Slika 3: a) Nikl kao materijal; b) Plinska turbina u čijoj je izradi korišten nikl 12
Slika 4: a) Titan kao materijal; b) Zrakoplov Lockhead SR-71 Blackbird čiji su kril i trup izrađeni od titana 13
Slika 5: a) Berilij kao materijal; b) Berilij u uporabi kod izrade kočnica zrakoplova .. 15
Slika 6: a) Aluminij kao materijal; b) Prikaz krila gdje se aluminij koristi za izradu unutarnjih konstrukcija 16
Slika 7: a) Drvo kao materijal; b) Zrakoplov Mosquito čija je unutarnja konstrukcija od drva 19
Slika 8: a) Bakelit kao materijal; b) Primjena bakelita u izradi elektroopreme 19
Slika 9: a) Tekstolit kao materijal; b) Prikaz izrade dijelova od tekstolita 20
Slika 10: a) Plastika kao materijal; b) Okviri prozora izrađeni od plastike 21
Slika 11: a) Fiberglas kao materijal; b) Fiberglas u izradi zakrilca zrakoplova 21
Slika 12: a) Stiropor kao materijal; b) Primjena stiropora u izradi izolacije zrakoplova 22
Slika 13: a) Pleksi-glas kao materijal; b) Pleksiglas u izradi prozora zrakoplova 23
Slika 14: a) Staklo kao materijal; b) Pilotska kabina čiji su dijelovi izrađeni od stakla 24
Slika 15: a) Guma kao materijal; b) Gume na kotačima podvozja zrakoplova 25
Slika 16: a) Kompozitni materijal kao materijal; b) Izrada trupa zrakoplova od kompozitnih materijala 26
Slika 17: Zrakoplov Boeing 787 Dreamliner 28
Slika 18: Zrakoplov A380 29

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1: Udio kompozitnih materijala u zrakoplovu prema godinama 26

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

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

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

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

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog rada pod naslovom **Značajke materijala u zrakoplovnoj konstrukciji**

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

Student/ica:

U Zagrebu, 29.5.2018

(potpis)