Uloga kompozitnih materijala u konstrukciji letjelica

Vučemilović Grgić, Sara

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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:119:339749

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
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 20. travnja 2016.

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

ZAVRŠNI ZADATAK br. 3315

Pristupnik: **Sara Vučemilović Grgić (0135233126)**
Studij: Promet
Smjer: Zračni promet

Zadatak: **Uloga kompozitnih materijala u konstrukciji letjelica**

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. Grupirati materijale koji se koriste u zrakoplovnoj industriji. dati primjer kompozitnih materijala koji se koriste u zrakoplovnoj konstrukciji. Ukazati na prednosti i nedostatke upotrebe kompozitnih materijala za izradu zrakoplova. na primjeru konkretnih zrakoplova utvrditi što se dobilo primjenom kompozitnih materijala u pogledu performansi, potrošnje goriva, cijene, itd. Izvesti konkretne zaključke i interpretirati rezultate istraživanja.

Zadatak uručen pristupniku: 4. ožujka 2016.

Mentor:

Andrija Vidović

doc. dr. sc. Andrija Vidović

Predsjednik povjerenstva za završni ispit:

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Sara Vučemilović Grgić

ULOGA KOMPOZITNIH MATERIJALA U KONSTRUKCIJI LETJELICA

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

ZAVRŠNI RAD

ULOGA KOMPOZITNIH MATERIJALA U KONTRUKCIJI LETJELICA

ROLE OF COMPOSITE MATERIALS IN AIRCRAFT CONSTRUCTION

Mentor: doc. dr. sc. Andrija Vidović
Student: Sara Vučemilović Grgić, 0135233126

Zagreb,2016.

Sažetak:

Danas su u zrakoplovnim konstrukcijama sve više zastupljeni kompozitni materijali. U ovom završnom radu opisana je primjena polimernih kompozita u zrakoplovnoj industriji. Spomenute su i ostale vrste kompozita koji imaju značajnu ulogu u zrakoplovstvu. Obrađena je teorija samih kompozitnih materijala, preko vrsta, njihovog načina proizvodnje te primjena u industriji, uz poseban naglasak na polimerne kompozite ojačane vlaknima.

Primjena kompozitnih materijala u zrakoplovnim konstrukcijama ističe se u raznim vrstama i kombinacijama. Svaka vrsta zasebno ima svoje prednosti i svojstva koja konkuriraju dosadašnjim konvencionalnim materijalima. U izradi strukturalnih elemenata zrakoplova kompozitni materijali omogućuju proizvodnju kompleksnih struktura i oblika, a zatim i vrlo visoke performanse tih elemenata. Upravo tim naprednim svojstvima hibridnih kompozitnih materijala omogućuje se razvoj i proizvodnja zrakoplova vrlo visokih performansi, male težine, te samim tim učinkovitijih i sigurnijih zrakoplova. Buduća tehnologija proizvodnje kompozitnih materijala uz popraćenu standardizaciju pruža automatizirane procese proizvodnje koji svojom tehnologijom smanjuju cijene izgradnje zrakoplova kompozitnih konstrukcija. Primjer primjene kompozitnih materijala na zrakoplovima Boeing 787 Dreamliner, Airbus 380 i Pipistrel Panthera obrađen je u ovom završnom radu.Ključne riječi ovog rada su kompoziti, vrste kompozita i njihova primjena u zrakoplovstvu.

KLJUČNE RIJEČI: kompoziti; vrste kompozita; primjena kompozita u zrakoplovstvu.

Summary:

In recent years the big emphasize in making the aircraft construction is put on a composite materials. The use of newest polymer composite in airplane industry are discribed in this final paper. Furthermore, the composite materials are introduced and explained. Different types, method of manufacture and application is explained more closely with the particular emphasis on polymer composites reinforced with fibers.

The composite materials in airplane industry can be used in many ways and in many different combinations. Each type has its own advantages and features that compete with the conventional materials. In making the structural elements of the aircraft composite materials enable the production of complex structures and forms which in a same time allows very high performance of the new materials. Because of these advanced properties of hybrid composite materials the development and production of the aircraft high performance is possible. The main features that are improved are decreased weight of the aircraft , therefore they has better safety of the aircraft. Future manufacturing technology of composite materials with standardization provides automated processes that reduces the cost of building an aircraft composite structures.In this final paper the application of composite materials on aircraft Boeing 787 Dreamliner, Airbus A380 and Pipistrel Panthera is closely explained.

KEYWORDS: composites; types of composites and their applications in aviation.

SADRŽAJ:

1. UVOD 1

2. KONVENCIONALNI MATERIJALI U ZRAKOPLOVNOJ KONSTRUKCIJI 3

2.1. Drvo 4

2.2. Metali 5

2.3. Lake slitine 6
2.3.1. Slitine aluminija 6
2.3.2. Slitine magnezija 7
2.3.3. Slitine bakra 7

2.4. Čelik 8

3. KOMPOZITNI MATERIJALI 9

3.1. Prednosti kompozitnih materijala 9

3.2. Nedostaci kompozitnih materijala 10

4. PODJELA KOMPOZITNIH MATERIJALA 11

4.1. Polimerni kompozitni materijali ojačani vlaknima 15

4.2. Proizvodnja vlaknima ojačanih kompozita 18
4.2.1. Namotavanje 18
4.2.2. Lijevanje 20
4.2.3. Pultrudiranje 20

4.3. Kompoziti ojačani česticama 21

4.4. Strukturni kompoziti 22
4.4.1. Slojeviti kompoziti 23
4.4.2. Sendvič konstrukcije 23
4.4.3. Stanični kompoziti 25

4.5. Ugljični kompozit 25

4.6. Hibridni kompoziti 27

4.7. Biokompoziti 28

5. KOMPOZITNI MATERIJALI NA ZRAKOPLOVIMA 29

5.1. Boeing B787 Dreamliner 30

5.2. Airbus A380 32

5.3. Pipistrel Panthera 33

6. ZAKLJUČAK 35

LITERATURA 36

POPIS SLIKA 38

POPIS GRAFIKONA 38

POPIS TABLICA 38

1.UVOD

Najstariji spomen o pokušaju letenja nalazi se u grčkoj legendi o Dedalu i Ikaru, koji su pokušali letjeti krilima sastavljenim od labudovih pera slijepljenih voskom. U 15. stoljeću čuveni talijanski umjetnik Leonardo da Vinci je skicirao više različitih konstrukcija letećih naprava i konstrukciju prvog padobrana. U 18. i 19. stoljeću dolazi do razvoja aerostatičnih konstrukcija, odnosno balona, koji su vladali približno 150 godina sve do početka 20. stoljeća.

Braću Orvillea i Wilbura Wrighta povijest pamti kao pionire zrakoplovstva koji su 17. prosinca 1903. godine izveli prvi upravljani let zrakoplovom na motorni pogon. U letu koji je trajao samo 12 sekundi preletjeli su tada fantastičnih 37 metara. Zrakoplov Flyer imao je razmah krila od 12 m, površinu krila od 47 m^2 težio je 283 kg. Bio je načinjen od tradicionalnih materijala, čvrstih i krutih vrsta drva: jasena i bijele omorike te čeličnih žica i cijevi, lake aluminijske slitine, a za izmjenjivač topline uporabljen je kositar.

U zrakoplovnoj industriji, kao i u svim ostalim granama, troškovi se pokušavaju minimalizirati, a u isto vrijeme kvaliteta proizvoda podići na višu razinu. Napravljena su mnoga istraživanja koja idu u svrhu unaprjeđenja zrakoplova prema iskorištavanju materijala koji su do nedavno bili zastupljeni u drugim granama industrije. Otkriveni kompozitni materijali koji se zbog svojih prednosti nad ostalim materijalima sve više upotrebljavaju u zrakoplovnoj industriji. Samim time su letovi postali pristupačniji većoj masi što dovodi do veće proizvodnje zrakoplova i veće potrebe za sigurnošću gdje su se kompozitni materijali našli kao najbolje rješenje.Njihov značaj raste do brojnih novih područja primjene gdje predstavljaju uspješnu alternativu klasičnim metalnim materijalima. Jedna od najvećih prednosti im je što su lakši 20-30% u odnosu na istovrsne metalne dijelove, a u zrakoplovstvu se najčešće upotrebljavaju za dijelove oplate trupa i krila. Nazivaju se polimerni kompoziti koji su najčešće laminarne strukture.

Predmet završnog rada je prikazati na koji način kompoziti poboljšavaju učinkovitost leta pojedinog zrakoplova. Cilj je prikazati primjenu kompozitnih materijala, njihov veliki značaj pri izradi zrakoplova u današnje vrijeme, te izložiti prednosti kompozitnih materijala, odnosno, dati odgovor na pitanje- zašto bi se kompozitni materijali trebali sve više koristiti u zrakoplovnoj industriji?

Rad je podijeljen u šest tematskih jedinica koje su međusobno povezane i zaključka koji je sinteza ovog završnog rada temeljena na činjenicama i s posebnim osvrtom na potencijal kompozitnih materijala i njihov budući razvoj za zrakoplovnu industriju.

U uvodnom dijelu definiran je predmet istraživanja i cilj istraživanja u završnom radu.

Drugo poglavlje obrađuje konvencionalne materijale u zrakoplovnoj konstrukciji, a to su: drvo, metali, slitine (slitine aluminija, magnezija i bakra), čelik. Opisane su i prednosti i nedostaci pojedinog materijala, te što se zahtjeva od zrakoplovnih materijala s gledišta funkcionalnih i eksploatacijskih zahtjeva.

Treće poglavlje detaljno opisuje kompozitne materijale, te se naglasak daje na njihove prednosti i nedostatke.

U četvrtom poglavlju predočena je podjelakompozitnih materijala. Glavna podjela kompozitnih materijala je prema vrsti matrice i ojačala. Opisane su i vrste kompozitnih materijala, a to su: polimerni kompoziti ojačani vlaknima gdje je opisana i sama proizvodnja takvih kompozita, kompoziti ojačani česticama, strukturni kompoziti koji se dijele dodatno na slojevite i stanične kompozite te sendvič konstrukcije, zatim su opisani ugljični i hibridni kompoziti, i za kraj biokompoziti.

Primjeri kompozitnih materijala na zrakoplovima Boeing 787 Dreamliner, Airbus 380 i Pipistrel Panthera obrađeni su u petom poglavlju. Opisane su prednosti tih zrakoplova i udio kompozitnih materijala na pojedinom zrakoplovu.

U zaključnom razmatranju dan je prikaz najbitnijih dijelova rada prema naprijed nabrojanim poglavljima.

2. KONVENCIONALNI MATERIJALI U ZRAKOPLOVNOJ KONSTRUKCIJI

Cijena samog zrakoplova u velikoj mjeri ovisi o materijalu konstrukcije i to čak do 60% iznosa. Razlog tome je što prijevoznici zahtijevaju određene uvijete kod izrade zrakoplovne konstrukcije, a to su na primjer mala masa, dobra otpornosti pri niskim i visokim temperaturama, postojanost prema koroziji, čvrstoća, dinamička otpornost i slično. Stoga se javlja potreba za novim i poboljšanim materijalima (ciljano razvijene slitine aluminija, magnezija ili titana, čelici povišene i visoke čvrstoće, kompoziti i drugi) koji uspješno udovoljavaju kompleksnim eksploatacijskim zahtjevima.

Važno je poznavati osobine pojedinog materijala i kako podnosi opterećenja jer sile opterećenja uzrokuju da se elementi razvlače, stlačuju, izvijaju, raslojavaju, mrve i da pucaju. Osnovne osobine materijala koje se mogu razmatrati pri djelovanju vanjske sile su čvrstoća, elastičnost, plastičnost, rastezljivost i krutost. Čvrstoća je sposobnost materijala da bez otkaza podnese i odupre se djelovanju vanjske primijenjene sile. Elastičnost je sposobnost materijala da se povrati u početni oblik i dimenzije nakon što na njega prestanu djelovati sile. Plastičnost je obrnuta od elastičnosti. Kad se elastični materijal deformira preko granice elastičnosti, prošao je plastičnu deformaciju. Rastezljivost, odnosno, žilavost je sposobnost materijala da se deformira bez pucanja. Krutost je obrnuta od rastezljivosti. Kruti materijali ne mogu promijeniti oblik pri djelovanju opterećenja već puca uz malo ili nikakvo prethodno upozorenje.[1]

Od zrakoplovnih materijala, s gledišta funkcionalnih i eksploatacijskih zahtjeva, traži se sljedeće:

- mala masa;
- visoka mehanička otpornost u uvjetima statičkog opterećenja;
- zadovoljavajuća krutost;
- otpornost umoru;
- otpornost na naglo širenje pukotina;
- korozijska postojanost
- mehanička otpornost pri visokim temperaturama (otpornost na puzanje);
- otpornost na gorenje,apsorpcija buke i vibracija

[1] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.,: *Zrakoplovna prijevozna sredstva 1*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2008., str.140

Osim ovih osnovnih zahtjeva definiranih određenim svojstvom materijala, u obzir se moraju uzeti i izvedeni kriteriji koji uključuju više svojstva:

- specifična čvrstoća – omjer vlačne čvrstoće i gustoće razvlačenja;
- specifična krutost – omjer modula elastičnosti i gustoće;
- sigurnost – umnožak granice razvlačenja i lomne žilavosti.[2]

U gradnji jedrilica upotrebljavaju se razne vrste materijala. One mogu biti: drvo, metali (čelici, lake slitine, nikal, itd.), kompozitni materijali, tkanine, ljepila, boje i lakovi za zaštitu, te ostali materijali.

2.1. Drvo

Jedan od najstarijih i najjednostavniji materijala koji se koristio za izgradnju konstrukcije zrakoplova bilo je drvo. Točnije, u periodu razvoja zrakoplovstva do 1. svjetskog rata drvo je bilo isključivi materijal za gradnju. Prvi let zrakoplovom izveli su ga braća Orville i Wilbur Wright 17. prosinca 1903. godine. Zrakoplov se zvao Flyer 1 i za izgradnju trupa koristili su drvo smreke koje je imalo najbolji omjer težine i čvrstoće.

Drvo kao konstruktivni materijal ima mnoge prednosti nad ostalim materijalima. Relativno mala specifična težina, niska cijena, pogodnost za raznovrsnu i vrlo brzu obradu, lako održavanje konstrukcije i mogućnost brzog popravka, visoka otpornost na zamor, visoka granica proporcionalnosti i praktično nepresušni izvor sirovina.

Drvo se danas se sve manje koristi, jer je pronađeno efikasnije rješenje što se samih materijala tiče (lake slitine, kompoziti, itd.). Drvo ima velike nedostatke. Na prvom mjestu je nehomogenost i anizotropnost materijala. Ovo dovodi do toga da mehaničke osobine drveta zavise od pravca djelovanja opterećenja u odnosu na prostiranje vlakana. Varijacije mogu biti 30-40%. Ima i nisku otpornost na smicanje. Pored toga, drvo je podložno utjecaju različitih mikroorganizama i atmosferskih promjena. Nepravilnosti u strukturi drveta (čvorovi, vrećice smole, usukanost linija godova i tok vlakana, pukotine od sušenja, trulež i slično), koje suujedno i organske mane, moraju se eliminirati prije korištenja u gradnji, pošto ova mjesta izazivaju smanjene nosivosti elemenata.

[2] Ćorić, D., Filetin, T.*: Materijali u zrakoplovstvu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2010., str. 15

Drvo se dijeli na tri osnovne grupe: liščari, četinari i strana (egzotična) finija drva. Liščari (drvo bjelogorice) mogu biti tvrdi (hrast, bukva, cer, brijest, grab, jasen, javor, orah, bagrem, trešnja, kruška, dud, lijeska, itd.) i meki (breza, lipa, topola, joha, divlji kesten, vrba itd.). Četinari (drvo crnogorice) su ariš, bor, jela, smreka, tisa, čempres i dr., a egzotična drva mahagonij, cedar, ebanovina, palisander, itd.

Pored ove podjele, može se napraviti podjela prema tvrdoći, i to na meko, srednje tvrdo i tvrdo. Da bi se dobio što homogeniji materijal, uglavnom se provodi takozvano lameliranje. Lameliranje se vrši na način da se drvo sječe u tanke lamele i ponovno se lijepi i tako se dobiva znatno povećana homogenost i otpornost. Ovaj način poboljšanja kvalitete drveta koristi se na mjestima visoko opterećenih elemenata konstrukcija (ramenjače, uzdužnice, itd.). Jedan od najvažnijih materijala koji se upotrebljava u gradnji je šperploča. Koristi se za oplatu krila, oplatu trupa, zidove ramenjače, itd. Prema kvaliteti izrade i kvaliteti primjenjivog materijala šperploču se može podijeliti na dvije kategorije: Prva kategorija se koristi pri izradi nosećih elemenata (ramenjače, torziona kutija, trup, itd.) dok se druga kategorija upotrebljava samo na slabo opterećenim elementima (obična rebra, pomoćni okviri, itd.).

2.2. Metali

Najvažniji zahtjev pri gradnji jedrilice je da se postigne određena otpornost uz minimalnu moguću težinu. Još jedan vrlo značajan zahtjev koji se stavlja pred materijale je otpornost na zamor. Pri konstruiranju i gradnji treba naročitu pažnju posvetiti mjestima gdje je moguća pojava zareza ili gdje oni već konstruktivno postoje, odnosno na mjestima koncentracije naprezanja.[3] Postoje, također, i nemetali gdje se svrstavaju, danas najbitniji, kompozitni materijali.

Osim kompozitnih materijala, nemetali su:

- bakelit (umjetna smola dobivena iz fenola, formalina i amonijaka koja pri temperaturi od 160°C mijenja agregatno stanje i postaje kruta i čvrsta),
- tekstolit (armirani bakelit), plastika, fiberglas (pločasti materijal, sličan limu, koji se sastoji od staklaste najlonske tkanine iz više slojeva slijepljenih sintetičkim smolama),
- stiropor (sintetički pjenasti materijal na bazi polistirena), pleksi-staklo (umjetno staklo akrilat dobiveno je polimerizacijom etera akrilne kiseline) i staklo, guma, konstrukcijska keramika, polimerni materijali, itd.[4]

[3] Ibidem, str. 23

[4] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: *Zrakoplovna prijevozna sredstva 1*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2008., str. 151-152

Metali i njihove slitine imaju vrlo dobra mehanička svojstva. Najčešće upotrebljavane slitinepri konstrukciji letjelica su: aluminij i njegove slitine, magnezij i njegove slitine, čelik i njegove slitine, nikal, titan i berilij.

2.3. Lake slitine

Kako je osnovna težnja u gradnji zrakoplova što manja težina uz dozvoljavajuću propisanu nosivost, korištenje lakih slitina, odnosno, slitina je našla svoju punu opravdanost naročito u gradnji jedrilica i lakih zrakoplova. U zavisnosti od osnovnih elemenata, lake slitine koje se koriste u gradnji zrakoplova dijele se na: slitine aluminija, magnezija i slitine bakra.

2.3.1. Slitine aluminija

Slitine aluminijasu se kao konstruktivni materijal počele koristiti tek poslije 1920. godine. Pripadaju lakim metalima niskog tališta. Relativno puno ga ima u zemljinoj kori u obliku oksida. Industrijski se racionalno dobiva samo iz boksita.

Prednosti slitine aluminija su: niska gustoća i težina, otpornost na atmosfersku koroziju, električna i toplinska vodljivost, homogenost materijala (izotopija), relativno laka obrada, hladna deformabilnost i recikličnost.

S druge strane su nedostaci: ograničena primjenjivost pri povišenim temperaturama, relativno loša zavarljivost, relativno niska otpornost na zamor, u slanoj morskoj vodi je podložna koroziji.

U zrakoplovstvu se najčešće primjenjuje duraluminij (Al-Cu-Mg), uz njega se još koristi i konstruktal. Slitine aluminija se klasificiraju prema tehnološkoj preradi (gnječene i lijevane), prema kemijskom sastavu, te s obzirom na mogućnost toplinske obrade (toplinski neočvrstljive i toplinski očvrstljive). Prema kemijskom sastavu se razlikuju: aluminij-silicij (Al-Si), aluminij-mangan (Al-Mn), aluminij-bakar (Al-Cu), aluminij-magnezij (Al-Mg), aluminij-cink (Al-Zn).[5]

[5] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1331628801-0-nezeljslitine.pdf, svibanj 2016.

Čvrstoća na lom poslije tzv. "starenja", a u zavisnosti od tipa slitine i načina termičke obrade dostiže veličinu do 550 MPa. Upotrebljavaju se za izradu kompletnih ramenjača, prešanih profila, rebara, okvira, oplate, cijevi, zakivaka (obični i cjevasti) itd. Otpornost aluminijske slitine odgovara vrijednostima običnoga nelegiranog ugljenog čelika, oko 40 – 45N/mm^2. Po osobinama obrade ove slitine su vrlo zahvalan materijal. Mogu se lijevati, prešati, kaliti, zavarivati, mehanički obrađivati, valjati, izvlačiti.

2.3.2. Slitine magnezija

Magnezij je sam po sebi vrlo sličan aluminiju. Slitine magnezijasu jedan od lakših konstruktivnih materijala. Zbog odličnih osobina lijevanja ove slitine su našle primjenu u zamijeni složenih elemenata konstrukcija koje su ranije bile ostvarivane zakivanjem ili varenjem iz više dijelova. Time se znatno smanjilopotrebno vrijeme obrade materijala, pa prema tome i troškovi izgradnje konstrukcije. Pored toga, ove slitine moguće je dobro prešati, valjati i lijevati pod pritiskom. Ostale vrline ovih slitina je što imaju mogućnost prigušenja vibracija. Nedostatak im je mala otpornost na koroziju, znatno su skuplji od aluminijevih slitina, otežana im je plastična obrada u hladnom stanju i vrlo su zapaljivi. Koroziju je moguće suzbiti premazivanjem elemenata izrađenih od slitina magnezija-bojom. Najznačajnije slitine magnezija (tzv. Elektron slitine) legirane su manganom i aluminijem. Upotrebljavaju se za izradu elemenata komandi, sjedišta, instrumentalne table, okvira trupa, rebara, oplate trupa, itd.

2.3.3. Slitine bakra

Slitine bakra (Cu) se koriste za izradu armatura, ležaja, čahura i opruga. Najčešća upotreba je za ležaje pošto pojedine vrste ovih slitina imaju odlična podmazivajuća svojstva. Prednosti ovih slitina su: vrlo dobra električna i toplinska vodljivost, sposobnost slijevanja s nizom metala, većina slitina ima vrlo dobru duktilnost i kovkost, vrlo dobra korozijska postojanost, nemagnetičnost i lijepa boja (crvena do žuta).Nedostaci su: visoka cijena, visoke temperature lijevanja, neotpornost prema oksidirajućim kiselinama, (vino, voćni sokovi i sl. jer nastaje otrovni bakrov acetat), ne smije se koristiti u dodiru s hranom ili u preradi prehrambenih namirnica, opasnost od vodikove krhkosti, itd.

Postoje nelegirani i nisko legirani bakar. Nelegirani se dijeli ovisno o vodljivosti na: električnu i toplinsku vodljivost. Slitine bakrase dijele na: slitine bakra i cinka (Cu-Zn – mjed) i slitine bakra bez cinka. Slitine bakra i cinka mogu biti: prave mjedi, specijalne mjedi, bakar-cink-nikal (Cu-Zn-Ni), te bakar-cink-kositar-olovo (Cu-Zn-Sn-Pb). Dok slitine bakra bez cinka mogu biti: bakar-kositar (Cu-Sn), bakar-aluminij (Cu-Al), bakar-kositar-olovo (Cu-Sn-Pb), bakar-olovo (Cu-Pb), bakar-berilij (Cu-Be), bakar-nikal (Cu-Ni), te na ostale bronce.[6]

2.4. Čelik

Kao konstruktivni materijal čelik je vrlo otporan, izdržljiv, pouzdan i siguran jer posjeduje vrlo kvalitetne mehaničke osobine. Od mnogih dobrih strana čelika, mogu se izdvojiti: mogućnost autogenog zavarivanja i mogućnost primjene termičkih procesa obrade (kaljenje, nitriranje, cementiranje, itd.), doprinose velikoj upotrebi čelika na mjestima najvećih opterećenja. Moglo bi se reći da je čelik nezamjenjiv za sve najvažnije i vitalne dijelove i spojeve na zrakoplovu, kao što su: glavni okovi krila, okovi repnih površina, okovi stajnog trapa, itd. Čelični materijali se po svojim bitnim osobinama mogu svrstati u dvije glavne skupine: obični ugljični čelici i takozvaneslitine čelika. No, čelik ima jedan veliki nedostatak, a to je njegova specifična težina, koje je oko 7,85kg/m^3.

[6] ibidem, svibanj 2016.

3. KOMPOZITNI MATERIJALI

Kompozit je tvorevina građena od međusobno spojenih dvaju ili više različitih materijala, koji su u osnovi netopivi jedan u drugome. Spojeni su s ciljem postizanja novog, drugačijeg i boljeg materijala specifičnih karakteristika i fizikalnim i kemijskim svojstvima koja nadmašuju svojstva pojedinačnih komponenata ili pak sa svojstvima koja ostale komponente same nemaju. Pritom se ne radi samo o poboljšanju preradbenih, doradnih i uporabnih svojstava (npr. povećanje specifične čvrstoće i specifičnoga modula elastičnosti, lomne žilavosti, toplinske postojanosti, otpornosti prema abraziji puzanju, itd.), nego i transportnih, skladišnih i otpadnih svojstva, uključujući konačno i cijenu. Prigušenje vibracija je, također, veće nego kod homogenih materijala. Spajanje kompozitnih poluproizvoda se uglavnom provodi mehaničkim vezama, lijepljenjem i lemljenjem. Kod ultračvrstih kompozita izrađuje se cijeli konstruktivni dio odjednom da se izbjegne spajanje sklopova.Doba suvremenih kompozita započelo je oko 1960. s razvojem borovih vlakana koja su osim visoke specifične čvrstoće imala i visoku specifičnu krutost.

Kompoziti su umjetno proizvedeni višefazni materijali koji imaju željenu kombinaciju boljih svojstava konstitutivnih faza. Obično, jedna faza (matrica) je kontinuirana i okružuje ostale (disperzne faze).Najčešće su nematali (poput keramike, karbonskih vlakana, aramida, fiberglasa i slično) kombinacija ugljičnih, staklenih ili borovih vlakana s polimernim, ugljičnim ili keramičkim matricama. Korištenjem kompozitnih materijala omogućuje se bolje upravljanje aerodinamičkim površinama, proizvodnja kompleksnijih dijelova strukture zrakoplova, povećanje nosećih elemenata, bolje dinamičke značajke, smanjenje operativne težine zrakoplova tj. smanjenje mase strukture, te produženi vijek trajanja konstrukcije.Jedan su od najnovijih i najznačajnijih materijala u izgradnji letjelica i ostale tehnike. Radi svojih svojstva – mala težina, a velika čvrstoća, kompoziti su istisnuli ostale materijale u gradnji lakih konstrukcija. Pogotovo kod gradnje jedrilica gdje su našli svoju punu primjenu iz razloga što omogućavaju izradu lakih, a čvrstih jedrilica sa nevjerojatno glatkim površinama.

Jedna od prvih primjena kompozita zabilježena je kod borbenih zrakoplova F-14 i F-15 prije više od 40 godina. Zahvaljujući njihovom kontinuiranom napretku, vrlo brzo se počinju primjenjivati i za složenije konstrukcijske elemente, poput oplate krila i trupa zrakoplova.

3.1. Prednosti kompozitnih materijala

U odnosu na ostale konvencionalne materijale, kompoziti posjeduju brojne prednosti:

- otpornost na koroziju;
- mala gustoća i mala masa;

- povoljan odnos čvrstoće i gustoće (specifična čvrstoća);
- povoljan odnos modula elastičnosti i gustoće (specifična krutost);
- mogućnost spajanja dijelova tijekom samog postupka proizvodnje;
- jednostavno i jeftino održavanje;
- dulji vijek trajanja;
- mogućnost "dizajniranja" svojstava;
- dimenzijska stabilnost pri ekstremnim radnim uvjetima.

Uporabom kompozitnih materijala u izradi zrakoplovnih konstrukcija značajno se može smanjiti sama težina zrakoplova i time ostvariti manja potrošnja goriva. Moguće je i povećati korisnu nosivost na račun manje težine, što opet povoljno utječe na troškovnu isplativost. Sljedeća prednost kompozita je mogućnost njihova oblikovanja u izratke jednostavnijeg oblika čime se smanjuje ne samo broj pozicija nekog sklopa, već i potreba za pričvršćivanjem i spajanjem. To dovodi do mnogih dodatnih prednosti: uz manji broj pozicija skraćuje se vrijeme potrebno za montažu, te se smanjuje i broj potencijalno opasnih mjesta za stvaranje pukotina, budući da elementi kao što su vijci i različiti provrti djeluju kao koncentratori naprezanja. U odnosu na konvencionalne konstrukcijske materijale kompoziti su manje osjetljivi na pojavu različitih oblika oštećenja što doprinosi njihovoj trajnosti.[7]

3.2. Nedostaci kompozitnih materijala

Nedostaci kod svakog materijala uvijek postoje, no kod nekih su manji, a kod nekih su veći. Kompozitni materijali imaju ih nekoliko: visoka cijena proizvodnje, mnogo kontrolnih pregleda tijekom proizvodnje, te mogućnost pojave proizvoda koji nisu za upotrebu. Kompozitni materijali zahtijevaju mnogo kompleksniju strukturu sa aspekta mehaničkih svojstava što nije slučaj i kod struktura izrađenih od metala i sličnih materijala.

Nedostatak kompozitnih materijala je i taj da se pukotine i zamor materijala ne može vizualno uočiti. Isto tako prilikom udara dvaju zrakoplova ili pada zrakoplova, trup zrakoplova napravljen od kompozitnih materijale se lakše zapali te se lakše razlomi u sitne dijelove. Još jedan nedostatak kompozitnih materijala je njihova sklonost skupljanju vlažnosti te se pri velikim visinama proširuje što može dovesti do delaminacije. Nedostatak kompozitnih materijala je injihova visoka cijena proizvodnje koja dostiže i nekoliko milijardi dolara uz neprestani rast.

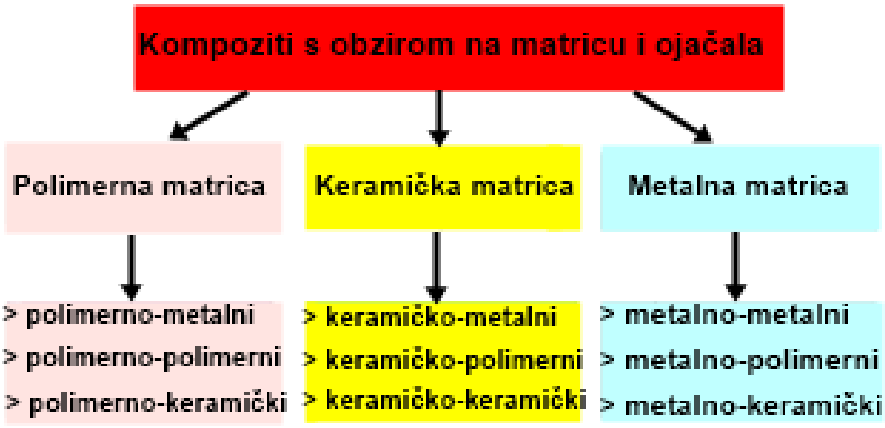
[7] Ćorić, D., Filetin, T.: *Materijali u zrakoplovstvu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010., str. 112

4. PODJELA KOMPOZITNIH MATERIJALA

Svaki kompozitni materijal u osnovi se sastoji od dvije faze – kontinuirane faze (matrični materijal), i dodatka, koji najčešće ima funkciju ojačala i obje faze su međusobno povezane. Pojedine faze su uglavnom nemetali, ali mogu biti i metali, kemijski i intermetalni spojevi. Matrica i dodaci imaju bitno različita mehanička svojstva. Dok su matrice mekše i služe kao punilo za postizanje stabilnosti oblika tvrde faze, dodatak je u manjoj količini čvrsta i tvrda faza, a to su uglavnom vlakna i čestice. Ojačala se povezuju preko matrice, to je ujedno i osnovna zadaća matrice. Točnije, zadaća matrice je da prijenosi opterećenja na ojačala i osigurava zaštitu od površinskog oštećenja. Uloga ojačala je da bude nosivi element kompozita, odnosno kompozitu daje pojedina svojstva: visok modul elastičnosti – krutost, otpornost kompozita na trošenje, toplinska vodljivost te visoka čvrstoća kompozita. Ponašanje kompozita očituje se u svojstvima materijala matrice i pojačala, veličinom i raspodjelom konstituenata, volumnom udjelu, njegovim oblikom, te prirodom i jakošću veza između konstituenata.

Podjela kompozita najčešća je s obzirom na (slika 1):

- materijal matrice
- oblik ojačala



Slika 1. Podjela kompozita s obzirom na matricu i ojačala

Izvor:https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1369657197-0-materijaliiikompoziti2013.pdf, srpanj 2016.

Ključni čimbenik za postizanje toplinske stabilnosti nije upotreba vlakana koja su izrazito otporna na koroziju, nego odabir kombinacije vlakno-matrica kojim će se, između ostalog, postići dobra adhezija.

Podjela prema matrici :

- metalna - MMC (Metal Matrix Composite)
- keramička - CMC (Ceramic Matrix Composite)
- polimerna – PMC (Polymer Matrix Composite)
- može biti i ugljična

Veza između tvrdih faza i matrice zavisi od vrsta materijala. Kod metala je vezivanje moguće difuzijom na dodirnim površinama tvrdih faza s matricom, stvaranjem mješanaca, intermetalnih ili kemijskih spojeva. Zavisno od trajanja procesa dobiva se i odgovarajuća debljina spoja. Kod polimera vezivanje je uglavnom adhezijom (lijepljenjem) površina. Kod slojastih kompozita lijepe se slojevi različitih materijala. Ukoliko se radi o slojevima različitih metala ili metalnih saća, utoliko se površine mogu vezivati lemljenjem. Čvrstoća kompozita najviše ovisi o čvrstoći i udjelu tvrde faze u matrici.[8] Ugljična matricaojačava se ugljičnim vlaknima. Materijal je velike čvrstoće i na visokim temperaturama i nalazi primjenu u raketnim motorima i toplinskim turbinama.

Osnovna svojstva skupina materijala:

- metali – čvrsti, duktilni, u pravilu teški
- polimeri – slabi, jako duktilni, laki
- keramike – tvrde, krhke, stabilne pri visokim temperaturama, lake

PMC (polimerni kompoziti) spadaju među najstarije kompozite, no i dalje se unapređuju njihova svojstva i proširuje se polje primjene. Od ovih kompozita izrađuju se konstrukcije koje moraju biti čvrste, krute, lagane i korozijski postojane, te su pretežno zamjena za slitine aluminija i magnezija, ali i za druge metalne materijale. Cilj ojačavanja je povećanje čvrstoće i krutosti (modula elastičnosti). Najviše vrijednosti čvrstoće i modula elastičnosti postižu se ojačavanjem vlaknima. Vlakna mogu biti visoko-čvrsta ili visoko-modulna.

Specifična čvrstoća (odnos čvrstoće i gustoće) i specifična krutost (odnos modula elastičnosti i gustoće) ovih materijala su znatno viši od metalnih materijala. Polimeri se ojačavaju s prirodnim vlaknima (laneno, juta, kudelja i sl.) radi bolje recikličnosti i manje opasne proizvodnje u odnosu na ojačavanje staklenim vlaknima. U začetku su genetska istraživanja bila za proizvodnju kvalitetnijih prirodnih vlakana. Varirajući vrstu vlakana, njihovu usmjerenost, prostornu strukturu, duljinu i udio, projektira se kompozit željenih

[8]Gabrić, I., Šitić, S.: *Materijali 1*, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, 2012.

mehaničkih svojstava. Projektiranje se provodi, u pravilu, CAD sustavima[9] pomoću metode konačnih elemenata.

Osnovni nedostaci MMC (metalni kompoziti) jesu relativno visoka gustoća i složenost proizvodnje koja traži visoke temperature. Stoga su matrice najčešće od slitine aluminija, titana i magnezija, ali i cinka i superslitina za veće radne temperature. Tijekom proizvodnje postoji opasnost kemijskih reakcija između ojačala i matrice pa se npr. primjenjuje difuzijsko spajanje pri visokim tlakovima i temperaturama ispod tališta. U metalnoj osnovi nalazi se sitno dispergirana nemetalna faza u obliku čestica ili vlakna. Za veće radne temperature ojačala su: u obliku vlakana ili viskera. Precipitacijska čvrstoća, bez bojazni od otapanja sekundarne faze porastom temperature, proučava se već niz godina. No, slika se dramatično izmijenila uvođenjem novih PM (polimerna matrica) postupaka za dobivanje mnogo finije raspršenosti nemetalne faze. U većini slučajeva ojačavajuća faza je stabilni oksid (udio od oko 1%), obično nekog drugog metala. Brojni su procesi koji se mogu primijeniti za postizanje vrlo jednolične raspršenosti. Najnoviji korak naprijed, predstavlja obitelj matrica kompozita napravljenih od slitine titana, sa uključenim raznim česticama, čime se povećava čvrstoća pri visokim temperaturama, povisuje se i tvrdoća i modul elastičnosti. Razvijene su superslitine od brzo skrućenog legiranog praha koji je HIP postupkom ili ekstruzijom kompaktiran i superplastično valjan u trakasti oblik.

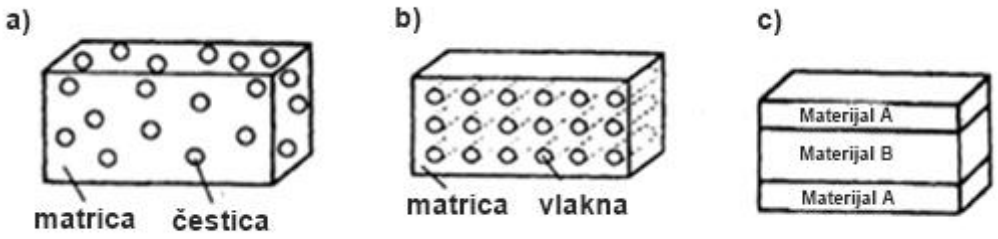
Keramički kompoziti (CMC) su primjenjivi za mehanički opterećene dijelove pri najvišim radnim temperaturama (to su npr. ugljik-ugljik kompoziti za dijelove svemirskih letjelica). Razvoj ovih vrsta kompozita je u vrlo ranoj fazi i postoji još niz tehnoloških problema, te se njihova šira primjena očekuje tek za 10-tak godina. Zbog krhkosti, krutosti i visoke tlačne čvrstoće keramička matrica se ponaša drugačije od žilavih polimernih i metalnih matrica. Žilavost keramičkom kompozitu povisuju vlakna na taj način što se energija za širenje pukotine troši za lomljenje, odvajanje i izvlačenje vlakana iz matrice. Što su vlakna tanja i mrežna struktura bolje projektirana (3-D tkanje) to se može očekivati ukupno bolja mehanička otpornost. Njihova niska gustoća i toplinska vodljivost čini ih atraktivnim za primjenu u toplinskim strojevima, zrakoplovnim i svemirskim uređajima kad su ovi izvrgnuti visokim temperaturama. Uz postojanje ekonomičnih postupaka izrade CMC proizvoda, oni bi bili idealni za primjenu na visokim temperaturama (> 2.000 °C) u uvjetima kemijski agresivne okoline i abrazijskog trošenja. Ovi su kompoziti teži za izradu od drugih jer su potrebne veće temperature i tlakovi, a keramička matrica se teže prilagođava ojačalu od polimerne ili metalne. Daljnji razvoj CMC ograničen je tehnologijama proizvodnje tankih prevučenih vlakana koja će biti otporna puzanju i djelovanju agresivne okoline, kao i niskotemperaturnim procesima izrade. Viskerima i česticama ojačani CMC skloni su pojavi katastrofalnih

[9]Computer-Aided Design (CAD) je program koji koristi kompjutersku grafiku za razvoj, analizu i izmjene tijekom postupka oblikovanja proizvoda.

pogrešaka. Kontinuiranim vlaknima ojačani CMC su pouzdaniji, ako vlaknasta struktura nosi opterećenje. [10]

Podjela kompozita prema obliku ojačala (slika 2):

- čestice
- vlakna
- strukturni kompoziti: Slojeviti kompoziti (laminati), sendvič konstrukcije, te mogu biti i stanični kompoziti



Slika 2. Podjela kompozita prema ojačalu: a) kompozit ojačan česticama, b) kompozit ojačan vlaknima, c) strukturni kompoziti

Izvor:https://ironlady003.wordpress.com/2014/05/12/kompozitni materijali/, srpanj 2016.

Kompoziti s vlaknima sadrže vlaknasta ojačala koja mogu biti u obliku viskera (vrlo tanke niti keramičkih monokristala visoke čistoće s velikom omjerom duljina/promjer), vlakana i žica (tipični materijali: čelik, molibden i volfram). Omjer ojačala u obliku viskera ide u rasponu od 20 do 1.000. Male dimenzije imaju za posljedicu velik udio pravilnosti kristalne građe, pa gotovo nema mogućnosti razlijevanja što vodi do izuzetno visoke čvrstoće.

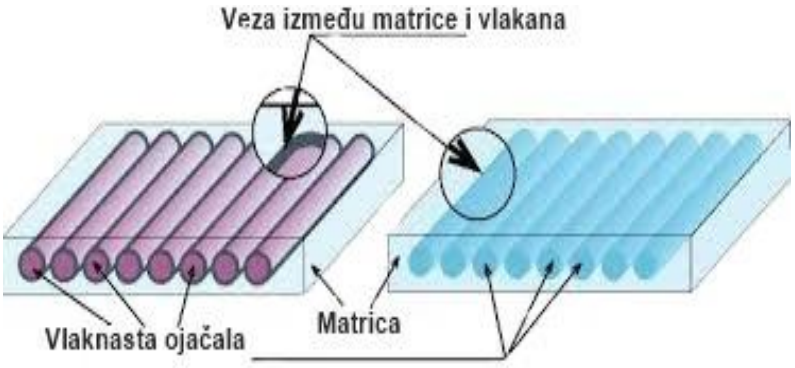
Usprkos visokoj čvrstoći, viskeri se ne primjenjuju u većoj mjeri budući da su zbog kompleksnih postupaka proizvodnje izuzetno skupi. Štoviše, često je gotovo nemoguće viskere ugraditi u matricu.

Vlakna su fine niti materije promjera obično manjeg od 10^{-6}m, a mogu biti polikristalna ili amorfna. Daleko su čvršća i tvrđa od bilo koje drugog oblika iste tvari. Postoje kontinuirana i diskontinuirana vlakna. Kontinuirana vlakna koja vode do najboljih svojstva često se teško proizvode i teško ugrađuju u matricu.

[10] http://hdmt.hr/wp-content/uploads/2016/03/1.pdf, srpanj 2016.

Dok diskontinuirana vlakna s velikim omjerom duljina/promjer znatno se lakše ugrađuju u matricu dovodeći tako do materijala visoke krutosti i čvrstoće.

Po rasponu omjera duljine i promjera razlikuju se kratka vlakna i duga. Kod kratkih vlakana odnos između duljine i promjera iznosi otprilike 100, a kod dugačkih je virtualno beskonačan. Na slici 3 nalazi se struktura kompozita ojačanih vlaknima.



Slika 3.Prikaz kompozita ojačanih vlaknima

Izvor: http://mohan.mse.gatech.edu/Research/stereocomplex_fiber/fig2.JPG, srpanj 2016.

4.1. Polimerni kompozitni materijali ojačani vlaknima

Prvi predstavnici kompozita bili su, upravo, polimerni kompoziti, točnije, polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima koji su se početno rabili za manje opterećene dijelove zrakoplova. Polimerni kompoziti sačinjeni su od polimerne smole kao matrice i ojačala, uglavnom u obliku vlakana. Tipično sadrže čvrsta, kruta i krhka vlakna u mekanijoj, duktilnoj i žilavoj polimernoj smoli. Vrlo česti kompoziti staklenog i ugljičnog ojačanja sadrže kruta i čvrsta, ali i krhka vlakna ugrađena u polimernu matricu, koja sama po sebi nije osobito ni kruta niti čvrsta.

Vlakna mogu biti polikristalna ili amorfna te imaju mali promjer.Vlakna nose opterećenje, te zbog visoke čvrstoće mogu zaustaviti širenje pukotine i u mikro području. No, sama vlakna se ne mogu primijeniti jer bi se brzo oštetila.

Općenito vlakna mogu biti:

- Prirodna vlakna (pamuk, sisal, lan, itd.)
- Staklena vlakna (E-staklo, S-staklo, R-staklo)
- Poliesterska vlakna (Dacron, Terilen, itd.)
- Aramidna vlakna (Kevlar, Twaron, itd.)
- Ugljična vlakna (Carbon)

- Metalna vlakna (žica ili žičano pletivo)

Vlakna se razlikuju prema:

- vrsti materijala,
- duljini, promjeru,
- orijentaciji i
- hibridizaciji.

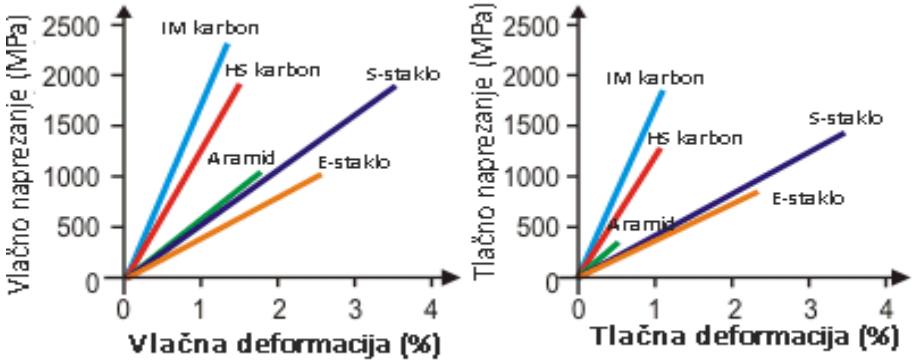
Danas su u uporabi vrlo raznoliki materijali ojačala da bi se dobila željena svojstva kompozita. Na osnovi staklenih vlakana ugrađenih u polimernu matricu dobiva se kompozit pogodan za primjenu u zrakoplovstvu. Tablica 1 prikazuje svojstva pojedinih vrsta vlakana.

Grafikon 1 prikazuje ovisnost vlačnog i tlačnog naprezanja o čvrstoći za pojedine tipove vlakana.

Tablica 1. Svojstva pojedinih vrsta vlakana

TIP VLAKNA	Gustoća	Promjer	Vlačna čvrstoća	Modul vlakna	Prekidno istezanje	Specifična vlačna čvrstoća	Specifični vlačni modul
	[kg/m^3 x 10^3]	[mm]	[GPa]	[GPa]	[%]	[GPa]	[GPa]
Poliester	1,38		1	11	14,5	0,72	8
E-staklo	2,54	8,0 - 14,0	3,4	72	1,8 - 3,2	1,34	2,8
S-staklo	2,49	8,0 - 14,0	4	86	4 - 4,5	1,57	34
Kevlar 49	1,45	11,9	3,6	130	2,2 - 2,9	2,48	90
Kevlar 29	1,44	12,1	2,9	69	4,4	2,02	49
Ugljična vlakna visoke čvrstoće (HS)	1,74	7,6 - 8,6	3,1	277	1	1,77	130
Ugljična vlakna visokog modula (HM)	1,81	7,0 - 9, 7	2,1	390	0,5	1,16	215

Izvor: https://www.google.com/patents/WO2011133872A2?cl=en, srpanj 2016.



Grafikon 1. Ovisnost vlačnog i tlačnog naprezanja o čvrstoći

Izvor: http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=978, srpanj 2016.

Uobičajeno je da su materijali matrice žilavi i duktilni kako bi prenosili opterećenje na vlakna, a s druge strane spriječili da pukotine između prekinutih vlakana napreduju kroz cijeli kompozit. Stoga su matrice osnovni nosioci opterećenja. No naravno, matrica mora biti i dovoljno čvrsta kako bi pridonijela ukupnoj čvrstoći kompozita.Kompoziti s usmjerenim vlaknima, nitima ili slojevima tvrde faze u matrici pokazuju veliku anizotropiju svojstava.

Najčešća jepolimerna matricaod nezasićenih poliestera i vinilnih estera, za zahtjevnije primjene i od epoksidnih smola, a ojačava se staklenim (za gradnju trupa plovila), aramidnim (zaštitni neprobojni materijali) ili ugljičnim vlaknima (sportski rekviziti). Kompozit s polimernom matricom ojačan staklenim vlaknima ima u smjeru vlakana vlačnu čvrstoću približno jednaku čeliku, ali je od njega četrnaest puta lakši.

S obzirom na ponašanje pri povišenim temperaturama polimerne se matrice mogu podijeliti na plastomerne, odnosno termoplaste kod kojih dolazi do promjena pod utjecajem topline i duromerne koje se ne mijenjaju povišenjem temperature. Duromerne matrice koriste se za zahtjevnije strukturne primjene, a najčešće se rabe epoksidne smole koje su otpornije prema vlazi i imaju bolja mehanička svojstva u odnosu na plastomere. Duromeri pri zagrijavanju stvaraju ireverzibilne kemijske veze između polimernih lanaca koji su međusobno snažno umreženi. Pri ponovnom zagrijavanju oni ne mijenjaju stanje već ostaju kruti sve dok se pod djelovanjem visoke temperature potpuno ne razgrade. Stoga ih nije moguće reciklirati. Termoplasti, odnosno plastomeri imaju svojstvo da se pri hlađenju stvrdnjavaju, ali pri ponovnom zagrijavanju se mekšaju, te ih je moguće ponovno oblikovati. Radi toga se mogu popravljati i djelomično reciklirati, ali zbog velike viskoznosti i visoke točke taljenja potrebne su visoke temperature i tlakovi.

Plastomeri su u zadnje vrijeme dobili na važnosti zbog veće duktilnosti i brzine proizvodnje od duromera, te dostupnosti plastomera koji mogu podnijeti visoke temperature.

Različiti su rasponi temperatura proizvodnje. Za duromerne smole (npr. epoksidi, bizmaleimidi, fenoli i furfurili) temperature proizvodnje se nalaze u rasponu od sobne temperature (20°C) do otprilike 200°C. Za termoplastične smole (poliimidi – PI, polietersulfoni – PES, polietereterketoni – PEEK, polieterimidi – PEI i polifenilensulfidi – PPS) upotrebljavaju se proizvodne temperature u rasponu 250 – 400°C. Matrica često određuje najvišu radnu temperaturu kompozita, budući da je običajno da s vremenom omekšava, topi se i degradira pri znatno nižim temperaturama nego vlakno. Epoksidi su dominantni za dijelove namijenjene upotrebi pri niskim i srednjim temperaturama, do 135°C. Bibizmaleimidi se koriste za temperature u rasponu od 135°C do 175°C. Za primjene pri vrlo visokim radnim temperaturama, 290 – 315°C, najčešće se odabiru poliimidi. Cijanantni esteri su relativno nova vrsta smole koja je napravljena kao konkurencija epoksimidima i bizmaleimidnima, te uz znatno višu cijenu daje manji stupanj apsorpcije vlage i dobra električna svojstva. Fenoli su visokotemperaturni materijal koji imaju visoku otpornost na dim i vatru, te se često koriste u izradi unutrašnjosti letjelica.[11]

4.2. Proizvodnja vlaknima ojačanih kompozita

Kako bi se vlakna vezala za same kompozite, postoje različiti postupci kojim se to može učiniti. Najčešći od njih su namotavanje, lijevanje i pultrudiranje. U sljedećim podpoglavljima će ti načini biti objašnjeni.

4.2.1. Namotavanje

Namotavanje (engl. filament winding) je postupak pri kojem se kontinuirana vlakna koja služe kao ojačalo namotavaju na model, koji obično bude cilindrični, tako da se oblikuju i stvore šuplji dio. Ovisno o tome prolaze li vlakna kroz smolu prije namotavanja ili se upotrebljavaju vlakna preprega razlikuje se mokro i suho namotavanje.

[11] Chung D. D. L.: *Carbon fiber composites*, Butterworth – Heinemann, Newton, 1994.

Rjeđe se koristi postupak kod kojeg se najprije vrši namotavanje vlakana na jezgru i zatim se impregnira smolom - ovaj postupak je poznat kao naknadno impregniranje.

Kod suhog namotavanja, namotavaju se preprezi koji su namotani na svitke. Oni se namotavaju bez prethodnog prolaska kroz kupku smole. Namotavanje preprega daje dobra svojstva kompozita i lako kontroliranje postupka. Nedostaci preprega su viša cijena i potreba za posebnim uvjetima skladištenja kako ne bi došlo do prijevremenog umreživanja. Ti preprezi sadrže dodatke poput otapala i dodataka za konzerviranje koji održavaju predumreženo stanje. Umreživanje preprega vrši se u autoklavu.Mokro namotavanje češće se primjenjuje od suhog. U tom slučaju vlakna prije namotavanja prolaze kroz kupku smole ili valjke natopljene smolom. Kako bi se povećala viskoznost smole, odnosno vlaženje vlakana, kupka smole se grije. Kontrola nanošenog sloja smole je otežana, a udio smole ovisi o viskoznosti, vlaženju, brzini namotavanja, te naprezanju vlakana. Taj postupak jeftiniji je od suhog namotavanja, ali ga nije lako kontrolirati. Umreživanje se vrši u pećima ili pri sobnoj temperaturi. Postupak namotavanja može se raščlaniti na četiri koraka: priprema vlakana i jezgre, namotavanje, umreživanje i uklanjanje jezgre.Postoji više tipova namotavanja: vijčano, prstenasto (obodno), paralelno (s osi jezgre) i polarno o čemu ovise i mehanička svojstva.Najčešće se primjenjuje polarno i vijčano namotavanje.[12]

Prednosti proizvodnje vlaknima ojačanih kompozita namotavanjem:

- vrlo brza i ekonomična metoda (niska cijena opreme, materijala i izrade) te kontrola brzine namotavanja;
- može se regulirati udio smole na vlaknima;
- visoka ponovljivost svojstava;
- visoki omjer čvrstoće i gustoće, visoki udio vlakana (do 80%) koji jamči višu čvrstoću;
- mogućnost proizvodnje velikih dijelova;
- troškovi su niži zbog toga što se rabe pojedinačna vlakna, a ne tkanja.

Nedostaci proizvodnje vlaknima ojačanih kompozita namotavanjem su:

- oblici proizvoda koji se dobivaju su ograničeni (isključivo konveksnog oblika);
- smještaj vlakana na različite oblike nije uvijek lagan (npr. uzdužno);
- troškovi dijela na koju se namotava (jezgra) mogu biti visoki u slučaju izrade velikih dijelova;

[12] Ćorić, D., Filetin, T.: *Materijali u zrakoplovstvu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010., str. 120-121

- vanjska površina proizvoda nije uvijek estetski prihvatljiva (nedorađena vanjska površina dijelova) – potreba za naknadnom obradom:
- izračunavanje kuta namatanja vlakana.[13]

4.2.2. Lijevanje

Polimerni kompoziti mogu se proizvesti različitim postupcima lijevanja. Ovisno o načinu kako se kapljevina polimerne smole unosi među vlakna, razlikuje se kapilarno djelovanje, tlačno lijevanje, vakuumsko infiltriranje ili kontinuirano lijevanje. Postoji poznati način lijevanja zvan RTM postupak (engl. Resin Transfer Moulding). Takav postupak se provodi na slijedeći način: polimerna smola ulijeva se pod tlakom u šupljinu kalupa i raspoređuje oko ojačala, a nakon polimerizacije potaknute zagrijavanjem, kalup se uklanja i dobiva izradak gotovog oblika. RTM tehnika ima svoje prednosti i nedostatke. Prednosti RTM tehnike: veliki volumni udjel ojačala, niski sadržaj zraka, dobri radni uvjeti te mogućnost automatizacije procesa, dok su nedostaci: visoka cijena alata i ograničenje na izratke malih dimenzija.[14]

4.2.3. Pultrudiranje

Za proizvodnju kompozitnih proizvoda konstantnog poprečnog presjeka (npr. štapovi, cijevi, grede, itd.) primjenjuje se pultrudiranje. Ovim postupkom se snop kontinuiranih vlakna prethodno impregniran (natopljen) duromernom smolom provlači se kroz alat odgovarajućeg oblika i nakon toga slijedi otvrdnjavanje čime se dobiva konačan oblik. Primjenom odgovarajućih alata mogu se proizvesti cijevi, šuplji elementi ili različiti drugi proizvodi konstantnog oblika. Glavna ojačala su staklena, ugljična te aramidna vlakna uobičajenih udjela od 40-70% volumnog udjela. Najčešće se kao matrice rabe poliesterske, vinilesterske te epoksidne smole.[15]

---

[13] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1426604989-0-pred6.pdf, srpanj 2016.
[14] Ćorić, D., Filetin, T.: *Materijali u zrakoplovstvu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2010., str. 121-122
[15] Ibidem, str. 122-123

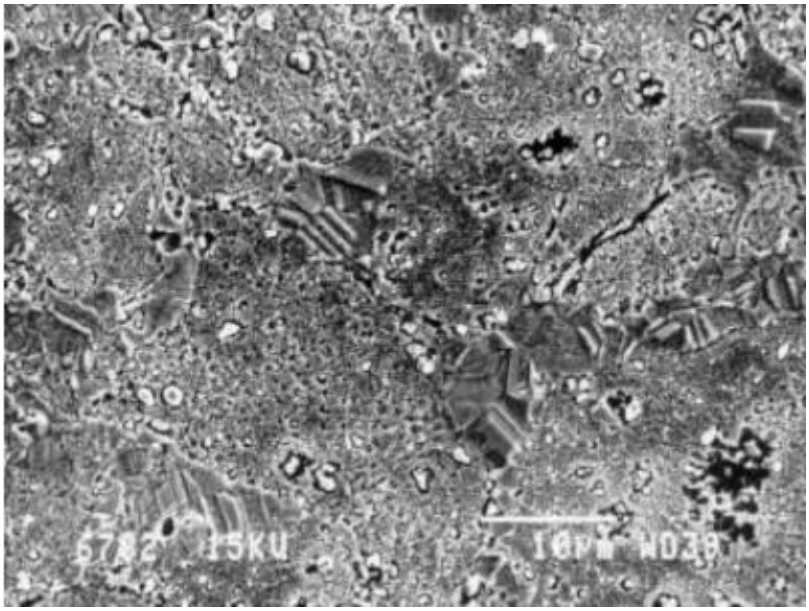
4.3. Kompoziti ojačani česticama

Za jačanje kompozitnog materijala mogu se koristiti i čestice. Čestice tvrdog i krhkog materijala koje su jednolično raspoređene u mekanijoj i duktilnijoj matrici. Struktura je kao kod mnogih dvofaznih disperzijskih ojačanih metalnih slitina.

S obzirom na veličinu čestica i način na koji utječu na ukupna svojstva, razlikuju se kompoziti s velikim česticama (čestice >1 μm) i kompoziti s disperzijom, tj. ojačani vrlo malim česticama (čestice <0,1 μm) koje povećavaju čvrstoću usporavanjem gibanja dislokacija u materijalu (10 do 250 nm, volumni udjel do 15%). Kod kompozita s disperzijom volumni se udjel čestica kreće do 0,15, a za kompozite s velikim česticama taj je udjel veći od 0,2. Primjeri su kompozita ojačanih česticama: beton (koji se može dodatno ojačati armiranjem), abrazivne paste za poliranje (tvrdi metali), čađom ojačana guma za pneumatike i dr. Čestice su najčešće od oksida, nitrida i karbida. Primaran cilj je povisiti otpornost na trošenje mehaničke otpornosti pri visokim temperaturama.[16]

Jedna od najvažnijih razlika između kompozita s česticama i onih s vlaknima direktno proizlazi iz njihove građe. Kompoziti s česticama općenito su izotropni, tj. njihova svojstva (čvrstoća, krutost, itd.) su identična u svim smjerovima, za razliku od kompozita s vlaknima koji su često anizotropni te svojstva variraju s obzirom na položaj vlakna. Anizotropnost se može djelomično prevladati slaganjem više slojeva ojačanja različite orijentacije pri čemu se dobiva slojeviti kompozit. Slika 4 prikazuje izgled jednog tipa kompozita ojačanog česticama, točnije bakreni kompozit ojačan disperziranim česticama B_4C.

[16] Ibidem, str 123



Slika 4. Bakreni kompozit ojačan disperziranim česticama

Izvor:https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1431694359-0-ntmpmckompoziti_15_1.pdf, srpanj 2016.

4.4. Strukturni kompoziti

Strukturni kompoziti u pravilu su formirani od homogenih materijala i kompozita. Svojstva im ne ovise samo o svojstvu i količini komponenata nego i od geometrijskih oblika obuhvaćenih dijelova. Ustrukturne kompoziteubrajaju se laminati i složene konstrukcije. Laminati su plošni slojeviti proizvodi od različitih materijala, npr. furnirske ploče ili šperploče, te kompoziti u kojima se vlakna u polimernoj matrici nalaze u slojevima. Različitom orijentacijom pojedinih slojeva mogu se smanjiti nedostatci linearne orijentiranosti kompozita ojačanih vlaknima. Složene konstrukcije (tzv. sendvič-konstrukcije) sastoje se od tankih vanjskih slojeva između kojih se nalazi neki laki materijal u obliku pčelinjeg saća (primjena u građi zrakoplova), pjene, nepravilnih vrpca ili listova (npr. valoviti karton) i sl. Strukturni kompoziti prema načinu slaganja se dijele na slojevite i stanične kompozite, te na sendvič konstrukciju.

4.4.1. Slojeviti kompoziti

Slojeviti kompoziti ili laminati su formirani od više slojeva različitih vrsta, karakteristika i debljina. Najčešće se sreću površinski slojevi kojima se osiguravaju željena svojstva površina dijelova ili sustava (tvrdoća, otpornost na trošenje i koroziju, poboljšanje izgleda) koja nema osnovni materijal. Površinski se slojevi nanose postupcima prskanja, sol-gel postupcima i kemijskim naparavanjem. [17] Laminati su, osim u vrlo specifičnim slučajevima, još uvijek anizotropni. Na temelju tog razvijaju se laminati s tako orijentiranim slojevima koji osiguravaju najbolja svojstva u smjeru djelovanja opterećenja. Time se ostvaruje ušteda na materijalu i prema tome na težini što je čimbenik od primarne važnosti u zrakoplovnoj industriji.

U zrakoplovstvu se često rad slojeviti kompoziti poznati kao „glare“ (engl. blještavi) laminati. "Glare" laminati sadrže aluminijske limove dodatno ojačane staklenim vlaknima. Između aluminijskih limova postavlja se staklena tkaninanatopljena polimernom smolom čime se dobije višeslojna struktura koja sadrži nekoliko redova ojačanja. Nakon što se to sve spoji i oblikuje u kalupu, materijal je izlaže povišenoj temperaturi i tlaku kako bi polimerna smola omekšala i polimerizirala čvrsto vezujući aluminijske slojeve.

Mehanička svojstva ovakvog kompozita određena su smjerom orijentacije vlakana u pojedinim slojevima. Zato se kod ugradnje "glare" laminati moraju tako orijentirati da imaju najveću mehaničku otpornost upravo u smjeru djelovanja najvećih vanjskih opterećenja. Osim veće mehaničke otpornosti "glare" laminati pokazuju i poboljšanu otpornost na pukotine. Ako se u aluminijskim limovima javi pukotina snop staklenih vlakana uspješno premošćuje pukotinu i na taj način usporava ili sprječava njeno širenje.[18]

4.4.2. Sendvič konstrukcije

Sendvič konstrukcije sastoje se od dva čvrsta i kruta tanka vanjska sloja između kojih se nalazi laki materijal koji čini jezgru. Jezgre su s obje strane vezane za oblogu. Međusobno su povezani i odvojeni „srčikom“. Zahvaljujući maloj masi odlikuje ih visoka specifična čvrstoća i visoka specifična krutost.

---

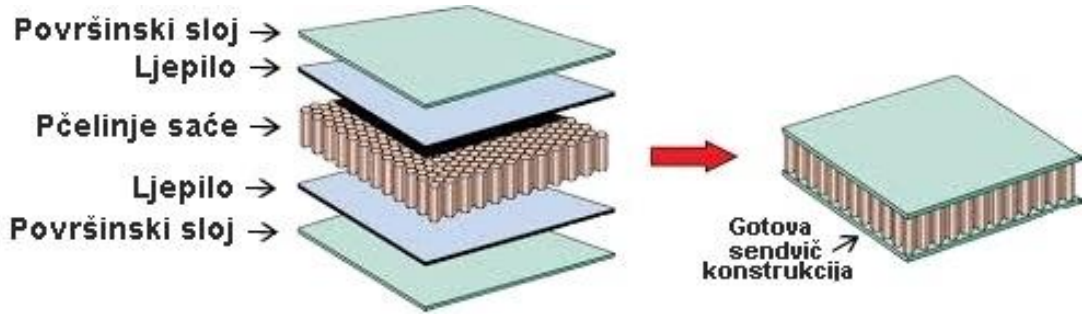
[17] http://documents.tips/documents/08-kompoziti.html, srpanj 2016.

[18] Ćorić, D., Filetin, T.: *Materijali u zrakoplovstvu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010., str. 124

Vanjske ploče mogu biti o bilo kojeg materijal, ali se preferiraju slitine aluminija, polimerni kompoziti ojačani vlaknima, titanove slitine, fiberglas s epoksidnom smolom, grafit epoxy ili čelik. „Srčika“ je uobičajno od aluminija ili fenolskog saćastog materijala za civilne i vojne zrakoplove, ali za srčiku se mogu upotrijebiti i različite krute pjene. U sendvič konstrukciji vanjske ploče nose najviše tlačnih i vlačnih naprezanja zbog svijanja. Dok srčika prenosi smicajuće sile i tlačne sile okomite na površinu. [19]

U zrakoplovstvu je osobito značajna struktura sendvič konstrukcije (slika 5) u obliku pčelinjeg saća koja sadrži aluminijsku jezgru oblika saća položenu između tankih vanjskih slojeva, najčešće aluminijske folije (limova) ili laminata. Time se dobiva vrlo postojan, krut, čvrst i izuzetno lagan sendvič koji je zahvaljujući svojim prednostima široko primjenjiv u izradi zrakoplovnih konstrukcija.

Kompozitni sendviči saćaste aluminijske jezgre široko su primjenjivi kod pregradnih zidova (npr. hermetizirane kabine), kormila, trimeri, dakle, sami rep zrakoplova i trup, ivičnjaci krila koji leže u slobodnoj zračnoj struji i elementi koji moraju biti visoke čvrstoće i visoke krutosti te istovremeno male mase.



Slika 5. Sendvič konstrukcija

Izvor: http://www.fibre-reinforced-plastic.com/2010/12/sandwich-composite-and-core-material.html, srpanj 2016.

[19] Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: *Zrakoplovna prijevozna sredstva 1*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2008., str. 154-155

4.4.3. Stanični kompoziti

Strukturu staničnih kompozita formiraju sjedinjene ćelije s tankim stjenkama (matrica), ispunjene plinom (dodatak). Ćelije mogu biti otvorenog i zatvorenog tipa.[20] Obično se proizvode dodatkom pjenila, odnosno, tvari koje se zagrijavanjem unutar polimerne matrice isparavaju ili kemijski reagiraju, stvarajući mjehuriće plina (najčešće ugljikov dioksid) koji iz nje izlazi (otvoreni tip ćelija) ili ostaje uklopljen u stvrdnutom polimeru (zatvoreni tip). Među najpoznatijim čvrstim pjenama su poliuretanska pjena i pjenasti polistiren, a najviše se rabe kao materijali za ambalažu te za toplinsku i zvučnu izolaciju.

4.5. Ugljični kompozit

Ugljik je sam po sebi kemijski element koji se nalazi svuda oko nas. Vrlo je lagan, vrlo stabilan i dolazi u mnogo oblika. Postoji nekoliko vrsta ugljičnih kompozita. Neki od njih su ugljik-ugljik, ugljična vlakna, ugljična nanocijev, ugljični polimerni kompozit, itd.

Ugljik-ugljik kompoziti su, kako i samo ime govori, kompozitni materijali u kojima su matrica i ojačalo napravljeni od ugljika. Takvi kompoziti su relativno novi i vrlo skupi materijali. Razlog visoke cijene je u vrlo složenom postupku proizvodnje kojim se čista ugljična vlakna ugrađuju u piroliziranu ugljičnu matricu. Ugljik-ugljik kompozit se mogu nazvati i kompoziti ojačani grafitnim vlakanima. Takvi kompoziti imaju tendenciju da budu

tvrđi, jači i lakši od samog čelika i drugih materijala. Glavna svojstva ove skupine kompozita su prije svega visok vlačni modul elastičnosti, otpornost puzanju te relativno visoka lomna žilavost i visoka vlačna čvrstoća, čak i na temperaturama iznad 2.000°C. Osim toga oni pokazuju malu toplinsku rastezljivost i visoku toplinsku vodljivost. No, njihov osnovni nedostatak je sklonost oksidaciji pri visokim temperaturama. Glavna primjena im je za raketne motore i konstrukcije suvremenih vojnih zrakoplova.[21]

[20] http://documents.tips/documents/08-kompoziti.html, srpanj 2016.
[21] Ćorić, D., Filetin, T.: *Materijali u zrakoplovstvu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010., str. 129

Kompozit ojačan ugljičnim vlaknima, zvan kao karbonska vlakna – Carbon fiber, su vlakna koja sadrže najmanje 90% ugljika, vrlo su fina, većinom kružnog presjeka, promjera 5 do 10 μm i svojstvene crne boje. Dobivaju se iz već oblikovanih drugih organskih vlakana, pretežno poliakrilonitrilnih vlakana velike čvrstoće, a u manjoj mjeri i od celuloznih viskoznih vlakana, te iz smolastog ostatka pirolize nafte (tzv. mezofazna smola). Neovisno o vrsti ishodišnoga materijala, proces dobivanja provodi se termičkom obradbom u nekoliko stupnjeva.

Općenito su za karbonska vlakna karakteristična sljedeća svojstva:

- velika čvrstoća (3.000 do 5.000 N/mm²) i velik modul elastičnosti (kod grafitnih vlakana 200.000 do 450.000 N/mm²),
- velika krutost,
- razmjerno mala gustoća u odnosu na metalne niti (1,5 do 2,2 g/cm³),
- izvrsna otpornost na toplinu uz istodobnu stabilnost dimenzija (termički raspad u području 3.600 do 4.000°C),
- veoma slaba gorivost,
- kemijska inertnost, neupijanje vlage,
- nekorozivnost,
- otpornost na kiseline, lužine i organska otapala,
- dobra toplinska i električna vodljivost,
- nemagnetičnost,
- vrlo mala apsorpcija rendgenskih zraka,
- izvrsna biokompatibilnost.[22]

Kada je u izgradnji neke konstrukcijepotreban materijal koji je čvrst i u isto vrijeme lagan, koriste se karbonska vlakna (engl. carbon fiber). U bliskoj budućnosti to bi se moglo promijeniti, tj. došlo je do pojave kompozitnog materijala koji je napravljen od rastegnutih karbonskih nanocjevčica (engl. stretched carbon nanotubes). U teoriji ovaj novi kompozitni materijal je deset puta snažniji od karbonskih vlakna. Istraživači sa Sveučilišta Sjeverne Karoline su nedavno uspjeli stvoriti takav materijal. Znanstvenici na fakultetu su proveli deset godina pokušavajući zadovoljiti četiri uvjeta koji su potrebni za stvaranje CNT (karbonske nanocijevi). Prvi uvjet je da cjevčica mora biti dugačka toliko da omogućava efektivan prijenos opterećenja. Drugi uvjet je da cjevčice moraju biti poravnate u redove. Treći uvjet koji mora biti zadovoljen je povećani omjer CNT prema polimeru ili smoli koja drži cjevčice zajedno. Zadnji uvjet koji mora biti zadovoljen je da su cjevčice što ravnije kako bi materijal podnio težinu ravnomjerno.

[22] http://kompozit-kemija.hr/portfolio-posts/karbonska-vlakna, srpanj 2016.

Cijeli proces započinje uzgajanjem mnoštvom dugih, tankih karbonskih cjevčica iz ravne podloge. Cjevčice nisu čvrste i zbog toga imaju tendenciju da padnu i da se naslone jedna na drugu. CNT se s jedne strane vuče sto povlači sve ostale cjevčice u redu sa sobom. Kao rezultat dobiju se poravnate cjevčice. Tako poravnati red se namotava u rolu i tim procesom se istovremeno rasteže i šprica s polimernom otopinom koja drži nanocjevčice zajedno. Kao rezultat ovog procesa nanocjevčice ojačavaju i dobiva se povišeni omjer CNT prema polimerima. Završni proizvod izgleda kao vrpčasti materijal. Nekoliko omeđenih slojeva koji se mogu koristit u razne svrhe od okvira za bicikl do materijala za zrakoplove. Zbog procesa rastezanja kompozitni materijal karbonske nanocjevčice imaju 90% veću rastezljivu snagu i 100% veću tvrdoću nego što bi bila bez procesa rastezanja. U isto vrijeme toplinska provodljivost je tri puta veća dok je električna provodljivost veća za 50%.[23]

4.6. Hibridni kompoziti

Hibridni kompoziti se dobivaju uporabom više vrsta vlakana koji služe kao ojačalo u jedinstvenoj matrici. Zbog vrlo velikog broja načina slaganja vlakana u matrici svojstva ovih kompozita mogu biti vrlo različita. Tako, na primjer, vlakna mogu biti usmjerena u jednom smjeru ili orijentirana u različitim smjerovima, laminati se mogu slagati iz različitih slojeva pri čemu je svaki sloj sastavljen od drugog tipa ojačala. Velika prednost ovakvih kompozita je znatno bolja kombinacija svojstava, nego što je to kod kompozita ojačanih samo jednom vrstom vlakana. Postoje razne kombinacije vlakana i matrica, ali ipak najčešće se koriste ugljična i staklena vlakna u polimernoj matrici.

Svojstva kompozita s ugljičnim i aramidnim vlaknima su dobra žilavost i vlačna čvrstoća od aramida, dobra tlačna i vlačna čvrstoća od ugljičnih vlakana, niska gustoća, ali i relativno visoka cijena. Svojstva kompozita s aramidnim i staklenim vlaknima su mala gustoća, dobra žilavost i vlačna čvrstoća od aramida, tlačna i vlačna čvrstoća od stakla, te vrlo bitna osobina im je što imaju nisku cijenu. Svojstva kompozita s ugljičnim i staklenim vlaknima su dobra tlačna i vlačna čvrstoća, krutost i niska gustoća od ugljičnih vlakana, te im je, također, niska cijena.[24]

[23] http://www.gizmag.com/cnt-composite-carbon-fiber-alternative/24593/, srpanj 2016.
[24] Ćorić, D., Filetin, T.: *Materijali u zrakoplovstvu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010., str. 130

4.7. Biokompoziti

Biokompoziti su kompozitni materijali i mogu biti napravljeni od prirodnih vlakana (biljnog ili životinjskog podrijetla) i biološki nerazgradljivih polimera nastalih derivacijama nafte (duromera - npr. epoksidna smola, fenolna smola i plastomera), od sintetičkih (umjetnih) vlakana i biopolimera (nastalih preradom biljaka) te od prirodnih vlakana i biopolimera koje su ujedno vrlo razgradivi kompoziti i često se nazivaju zeleni kompoziti. Prirodna vlakna mogu biti biljnog i životinjskog podrijetla. Vlakna biljnog podrijetla su drvo, trava, lišće, sjeme, voće, itd., dok su od životinjskog vuna, dlaka, svila, itd. Vrste prirodnih vlakana su lan, konoplja, kenaf, juta, heneken, kokos, drvo, kukuruz, trava i sl.

Prednosti prirodnih vlakana su ta što imaju obnovljive izvore lako su dostupna, mali udio utroška energije tijekom proizvodnje. Mala gustoća (specifična težina) osigurava visoku specifičnu čvrstoću i krutost u usporedbi sa staklenim vlaknima, stoga su sigurnijaza rukovanje i proizvodnju u odnosu prema sintetičkim vlaknima. Zbog manjeg trošenja opreme jer su prirodna vlakna ne abrazivna u odnosu prema sintetičkim vlaknima, visoka električna nevodljivost, dobra zvučna izolacija, ne nastaje CO_2 (biljke stvaraju jedino ugljične spojeve prilikom izgaranja ili kompostiranja) imaju nisku cijenu proizvodnje

Nedostaci su im što su teško su raspršljivi u matrici. Prirodna vlakna su higroskopna – upijaju vlagu, što ima za posljedicu stvaranje pora, slabljenje veza, a time i lošijih mehaničkih svojstava kompozita. Vlakna počinju degradirati u rasponu do 90 do 200°C, pa su temperatura obrade i izbor materijala matrice ograničeni, osjetljiva su na truljenje/degradacije iz okruženja (mikroorganizmi, gljivice, itd.), te im dimenzije vlakana i mehanička svojstva variraju od biljke do biljke.S obzirom da su prednosti veće od nedostataka, prirodna vlakna bi u budućnosti trebala biti zamjena za staklena vlakna. Postoje neka unaprjeđenja koja su potrebna za povećanje mehaničkih svojstava, ali i stabilnosti svojstava, kako bi mogli imati primjenu u konstrukcijskim aplikacijama. Prirodna vlakna su, kao što im ime govori, „bio“ što podrazumijeva da su obnovljiva i reciklirajuća.[25]

[25] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1426604989-0-pred6.pdf, srpanj 2016.

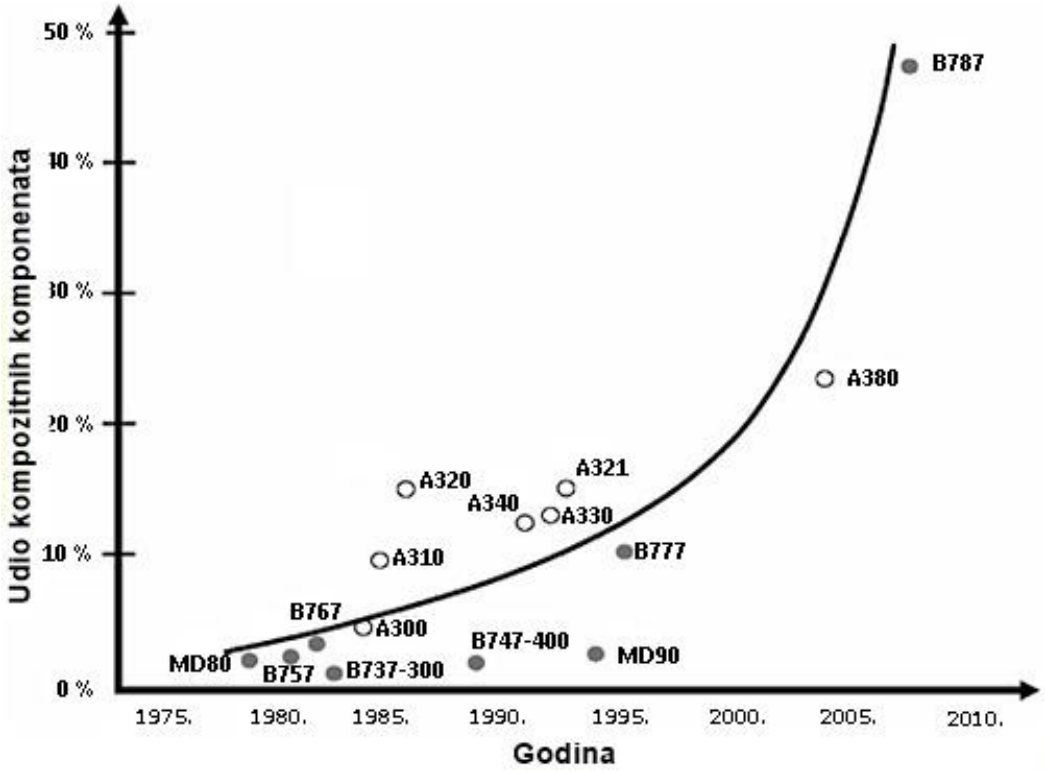
5. KOMPOZITNI MATERIJALI NA ZRAKOPLOVIMA

Svaki zrakoplov se razlikuje od ostalih po određenim osobinama. Svaki zrakoplov ima svoj udio kompozitnih i ostalih konstruktivnih materijala. No, današnja tehnologija gradnje od kompozita je dostigla vrlo visoki stupanj, tako da omogućava gotovo potpunu izradu jedrilica od ovih materijala. Jedino se okovi i neki drugi elementi izrađuju od čelika, durala i sličnih materijala.

Cijena pojedinog zrakoplova ovisi o svojstvima i opremi određenog zrakoplova. Bilo da su to udobnija sjedala, veličina zrakoplova, maksimalna brzina letenja i slično, no cijena uvelike ovisi i o korištenim materijalima. Da li je lakši i čvršći zbog boljeg materijala i da li će radi toga moći imati veću nosivost ili većispremnik goriva, što ujedno znači i da će moći preletjeti duži put? U nastavku su opisani zrakoplovi koji u svojoj konstrukcijisadržavaju značajnije udjele kompozitnih materijala.

Boeing 787 Dreamliner jenajbolji primjeruporabe kompozitnih materijala u komercijalnom zrakoplovstvu te je prvi zrakoplov koji ima trup, krila, rep, vrata i mnoge druge komponente napravljene od kompozitnih materijala. Airbus 380 je najveći komercijalni zrakoplov u današnje vrijeme kojije ukomponirano najnaprednije materijale u izgradnji zrakoplova. Posljedica toga je smanjena cijena letova za 15% u usporedbi s ostatkom konkurencije. Zadnji zrakoplov koji je opisan je zrakoplov Pipistrel Panthera, letjelica generalne avijacije koja je u potpunosti napravljena od kompozitnih materijala.

Iz godine u godinu, kako dolaze novi zrakoplovi tako imaju veći postotak kompozitnih materijala. Sukladno tome, izrađen je grafikon (grafikon 2) koji prikazuje raspodjelu zrakoplova po godinama u ovisnost o postotku korištenja kompozitnih materijala u njihovoj konstrukciji.



Grafikon 2. Postotak kompozitnih materijala na zrakoplovima

Izvor:http://www.ncl.ac.uk/newrail/assets/docs/FinalReport-Aerospace.pdf, srpanj 2016.

5.1. Boeing B787 Dreamliner

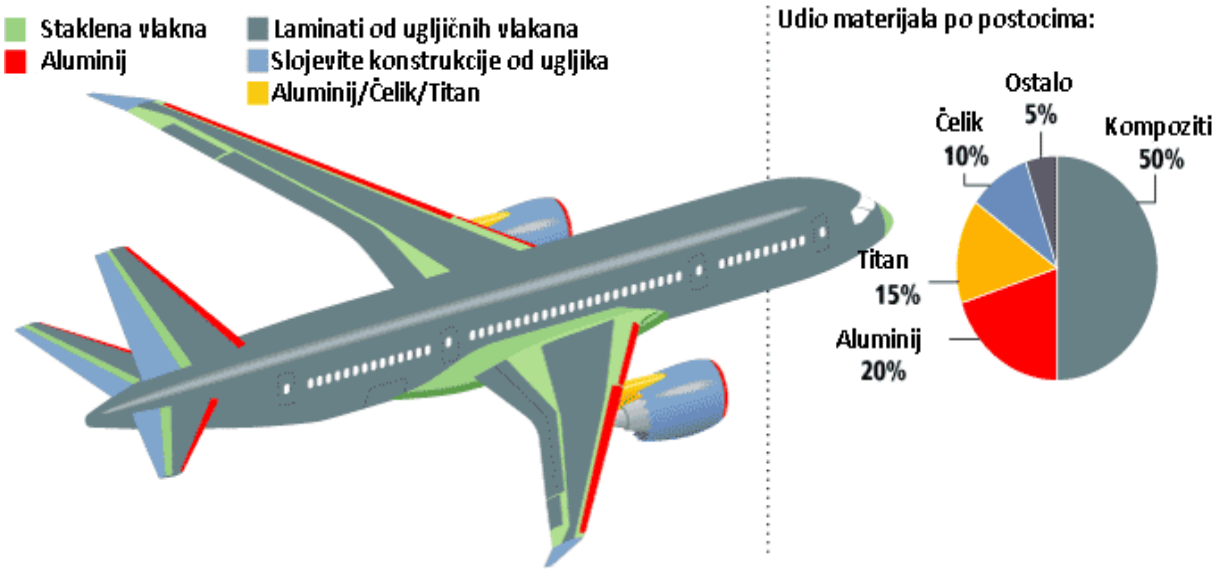
Zrakoplov Boeing 787 Dreamliner je širokotrupni zrakoplov sa dva motora, s dugim doletom, te (ovisi o modelu) ima tri putničke klase i do 330 putničkih mjesta. Prvi let je obavljen 15. prosinca 2009. godine, a na tržištuse pojavio krajem 2011. godine. Ovisno o kojem je modelu riječ, cijena Dreamlinera iznosi oko 306,1 milijuna američkih dolara.

Odabir optimalnog materijala za određenu primjenu na zrakoplovu zahtjeva analizu cijele konstrukcije pri stvarnim uvjetima, kako bi se utvrdili najbolji materijali za pojedine dijelove. Ta analiza se ujedno koristila i na zrakoplovu B787. Analizom se utvrdilo da je aluminij osjetljiv na zatezna opterećenja, ali vrlo dobro podnosikompresiju. Dok se s druge strane dokazalo da je kod kompozita obrnuto. Stoga se kompozitni materijali uglavnom koriste kod dijelova trupa podložnim visokim zateznim opterećenjima kod kojih je održavanje zbog zamora znatno lakše u usporedbi s aluminijskom strukturom. Analiza vezana za opterećenja je ujedno rezultirala i povećanom uporabom titana u zrakoplovnoj konstriukciji. Titan može izdržati visoka opterećenja bolje od aluminija, manje je podložan zamoru, te je

vrlo otporan na koroziju. Radi svojih osobina titan se na zrakoplovu B787 upotrebljava na otprilike 15% zrakoplovne strukture.[26]

Boeing 787 je prvi komercijalni zrakoplov koji ima trup, krila, rep, vrata i mnoge druge komponente zrakoplova napravljene od kompozitnih materijala zbog čega postaje lakši i pouzdaniji. Ujedno je i najekonomičniji jer smanjuje ukupnu potrošnju goriva i do 20% u odnosu na ostale zrakoplove. Na slici 6 vidi se raspored materijala po dužini zrakoplova te raspodjela kompozita u postocima.

Sudeći prema 584 narudžbe prije same prodaje zrakoplova, uspjeh ovog modela zrakoplova je zajamčen.Razlozi za to su jednostavni: kupci za isti novac koji su izdvajali za model 767-300 tijekom osamdesetih godina prošlog stoljeća (oko 120 milijuna američkih dolara) dobiju novi, brži avion sa daleko jednostavnijim održavanjem. Zbog lakoće konstrukcije, trošit će se manje goriva, a putnici će uživati u većem komforu, zbog bolje klimatizacije i ljepše uređenosti putničke kabine. Kada se kaže da ima bolju klimatizaciju, figurativno se može reći da leteći Dreamlinerom putnici neće se udisati zrak sa planine visoke 2.400 m, već 1.800 m gdje je tlak puno manji.[27]



Slika 6. Raspodjela materijala uzduž zrakoplova Boeing 787 Dreamliner

Izvor: http://www.appropedia.org/images/d/d7/Composites01.jpg, srpanj 2016.

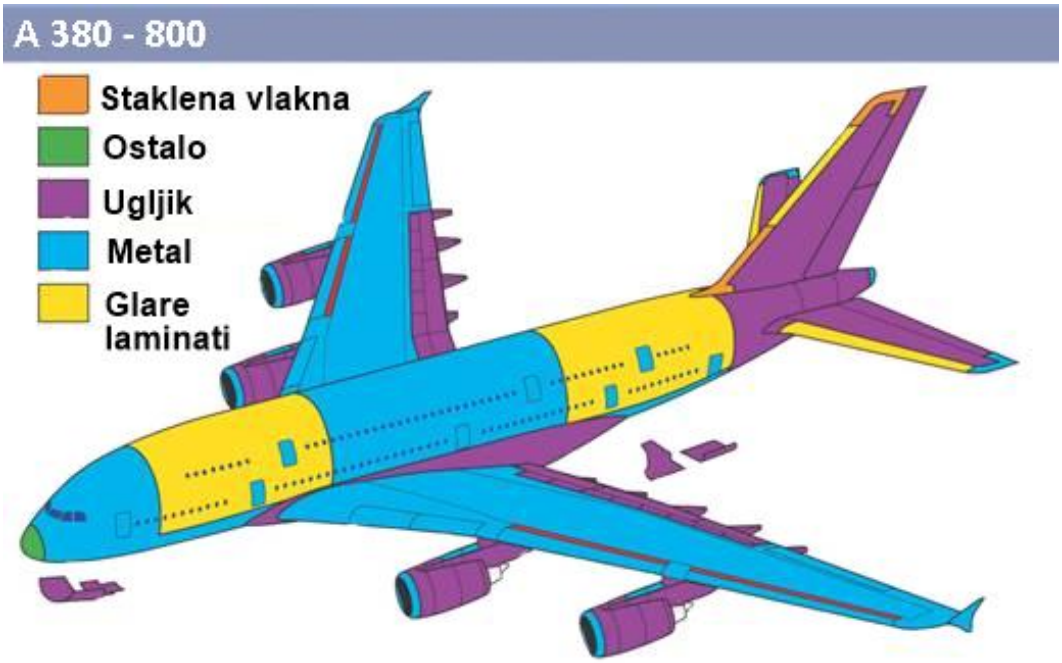
[26] http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.html, kolovoz 2016.
[27] http://www.mycity-military.com/Avioni/Boeing-787-Dreamliner.html, srpanj 2016.

5.2.Airbus A380

Zrakoplov Airbus 380 je najveći komercijalni zrakoplov. Ima dvije palube, širokotrupni je, ima četiri motora, te mu je dolet oko 15.200km. Izašao je na tržište 25. listopada 2007. godine, ima 853 putničkih mjesta, maksimalan kapacitet goriva je 320.000 litara, te mu je cijena oko 432,6 milijuna američkih dolara.

Airbus 380 je ukomponirano najnaprednije materijale u izgradnji zrakoplova te je zbog toga smanjena cijena letova s ovim zrakoplovom za 15% u usporedbi s ostatkom konkurencije. Materijali koji su ukomponirani su aluminijske slitine za krila i trup zrakoplova te je povećana uporaba kompozitnih materijala u samom trupu, repu zrakoplova i duž rebara u krilima. Zrakoplov A380 uz ostale materijale koristi i Glare materijal.Glare materijal je laminat koji se sastoji od aluminijskih slitina i ljepila ojačana armiranim staklenim vlaknima. Slaganjem staklene tkanine natopljene polimernom smolom između aluminijskih limova dobiva se višeslojna struktura.Uporabom Glare materijala dolazi čak do 30%smanjenja težine u odnosu na klasične aluminijske slitine, i pruža vrlo dobru otpornost na oštećenja i zamor materijala. Rabe se za oplate trupa zrakoplova, za bočne panele (ploče), gornje dijelove krila, te krmene dijelove trupa. Ugrađeni laminati sadrže četiri ili više aluminijskih limova debljine 0,38 mm između kojih se nalazi vezni sloj smolom natopljenih staklenih vlakana. Aluminijski sendvič paneli se koriste u izradi izbočenih dijelova oplate koji spajaju trup i krilo. Raspodjela materijala na zrakoplovu prikazana je na slici 7. Korištenje novih tehnologija kao što su unaprijeđeni središnji sustav za održavanje i generatori promjenjive frekvencije pojednostavljuju apsorpciju električne energije kod velikih zrakoplova. Samim time dolazi do velike pouzdanosti i pojednostavljenogodržavanja zrakoplova. Hidrauliku zrakoplova osiguravaju dva potpuno nezavisna sustava kojima je radni tlak 5.000 psi., umjesto običajnih 3.000 psi. Povećani tlak omogućava manju i lakšu hidrauličku opremu te je potrebna i manja količina hidraulične tekućine u samom zrakoplovu.[28]

[28] http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/innovation/, srpanj 2016.



Slika 7. Raspodjela materijala na zrakoplovu A380-800

Izvor:https://www.coursehero.com/file/p4rgj0j0/Commonly-Used-Pre-Impregnated-with-Epoxy-Pre-Pregs-Fiber-Direction-Control-of/, srpanj 2016.

5.3. Pipistrel Panthera

Zrakolov Pipistrel Panthera je letjelica sa četiri sjedala namijenjena za generalnu avijaciju, načinjena u potpunosti od kompozitnih materijala. Može doseći brzinu leta od 370 km/h (najveća dopuštena brzina je 407 km/h) i pri tome potroši 38 litara običnog automobilskog benzina na sat. Ima dolet preko 1.900 km i udobnu i prostranu kabinu. Prava revolucija je modularnost pogona – kupac može birati čak tri različita pogonska sustava: obični (na benzin), hibridni ili potpuno električni. To je prva letjelica na svijetu, koja omogućuje takav izbor.Hibridni i električni modeli imaju dodatno smanjenu buku pri polijetanju. Panthera je potpuno nova putnička letjelica, načinjena u cijelosti od visokotehnoloških kompozitnih materijala. Svi sustavi su u cijelosti razvijeni i načinjeni u Pipistrelu.[29] Cijena letjelice s benzinskim motorom iznosi 480.000 američkih dolara.[30]

[29] http://hr.irt3000.si/vijesti/?id=157, srpanj 2016.
[30] http://www.planeandpilotmag.com/article/pipistrel-panthera/#.V5tLJriLS00, srpanj 2016.

Zrakoplov je dizajniran tako da se ljudi osjećaju sigurno, opuštajuće i ugodno, ne stvara preveliku buku te je manje štetan za okoliš. Panthera je inovativni zrakoplov koji vrlo lako privlači pozornosti promatrača i potencijalnih kupaca, te ima visoke performanse. Učinkovitost postiže radi svog aerodinamičkog oblika, podvozja napravljenog od titana, lagane kompozitne strukture, elise proporcionalnog oblika i posebne izvedbe ispušnog ventila. Na slici 8 vidi se elegantan oblik letjelice Pipistrel Panthera.

Uz nisku potrošnju goriva pri velikoj brzini ima gotovo jednaku snagu kao i pri malim brzinama. Ne postoji niti jedan drugi zrakoplov sa četiri sjedala koji leti tako brzo s takvim motorom. Za vlasnika ovakvog zrakoplova to predstavlja značajno smanjenje operativnih troškova i pojednostavljeno održavanje. Dolet od 1.000 nm je moguć bez obzira s kojom količinom tereta je opterećen. Robustan dizajn podvozja omogućuje letjelici da lako sleti i na travnate uzletno-sletne staze. Motor letjelice će u budućnosti moći prihvatiti i bezolovno gorivo i time ispunjavati buduće postrožene ekološke zahtjeve. Gotovo 95% strukture je izrađeno od kompozita ojačanim ugljičnim vlaknima. Ima podvozje koje je moguće potpuno uvući u trup letjelice, i to podvozje je izrađeno od titana, dajući mu vrhunsku čvrstoću i energetsku apsorpciju uz minimalnu težinu. Gotovo svi sustavi na letjelici su u potpunosti električni, jer se nastojalo izbjeći potrebu za složenim i teškim hidrauličkim sustavima.[31]



Slika 8. Pipistrel Pantera

Izvor:http://www.planeandpilotmag.com/article/pipistrel-panthera/#.V5tLJriLS00, srpanj 2016.

[31]http://www.pipistrel.si/plane/panthera/overview, srpanj 2016.

6. ZAKLJUČAK

Zahvaljujući brojnim inovacijama na području razvoja postojećih materijala i stvaranjem novih vrsta materijala omogućen je razvoj brojnih područja pa tako i zrakoplovne industrije koja je zahvaljujući tome bitno uznapredovalo od svojih prvih početaka do danas.

U zrakoplovnoj industriji, kao i u svim ostalim granama, troškovi se pokušavaju minimalizirati, a u isto vrijeme kvaliteta proizvoda podići na višu razinu. Zbog toga su napravljena mnoga istraživanja koja idu u svrhu unaprjeđenja zrakoplova prema iskorištavanju materijala koji su do nedavno bili zastupljeni u drugim granama industrije.

Kompozitni materijali se zbog svojih prednosti nad ostalim materijalima sve više upotrebljavaju u zrakoplovnoj industriji.Kao rezultat uporabe te vrste materijala direktno se smanjuje konstruktivna težina zrakoplova, a time se smanjuje i potrošnja goriva, smanjuju se i operativni troškovi zrakoplova, povećava se plaćeni teret i letne performanse zrakoplova. Vrlo dobra svojstva oblikovanja kompozitnih materijala pružaju inženjerima mogućnost za razvoj dizajna zrakoplova visokih aerodinamičnih karakteristika.

Kompozitni materijali su materijali sadašnjosti, ali i budućnosti zrakoplovne industrije. Primjenom nano-tehnologije proizvodit će se još kvalitetniji materijali s još naprednijim svojstvimakoji će dodatno pridonijeti kako letnim svojstvima i cijeni proizvodnje i eksploatacije zrakoplova, tako i najbitnijem elementu – povećanju sigurnosti zračne plovidbe.

LITERATURA

1. Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: *Zrakoplovna prijevozna sredstva 1*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2008.
2. Ćorić, D., Filetin, T.: *Materijali u zrakoplovstvu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
3. Gabrić, I., Šitić, S.: *Materijali 1*, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, 2012.
4. Chung D. D. L.: *Carbon fiber composites*, Butterworth – Heinemann, Newton, 1994.
5. Soutis, C.: *Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction*.pdf; 2005.
6. Taczak, M. D.: *A Brief Review of Nanomaterials for Aerospace Applications:Carbon Nanotube-Reinforced Polymer Composites*.pdf; 2006.
7. Parhizgar, S.: *Fracture mechanics of unidirectional composite materials*, Ames, Iowa, 1979.
8. Obert, E.:*Aerodynamic design of transport aircraft*, Faculty of Aerospace Engineering, Delft, 2009.
9. https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1331628801-0-nezeljslitine.pdf, svibanj 2016.
10. https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1369657197-0-materijaliiikompoziti2013.pdf,srpanj 2016.
11. http://hdmt.hr/wp-content/uploads/2016/03/1.pdf, srpanj 2016.
12. https://ironlady003.wordpress.com/2014/05/12/kompozitni materijali/, srpanj 2016.
13. http://mohan.mse.gatech.edu/Research/stereocomplex_fiber/fig2.JPG, srpanj 2016.
14. https://www.google.com/patents/WO2011133872A2?cl=en, srpanj 2016.
15. http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=978, srpanj 2016.
16. https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1426604989-0-pred6.pdf, srpanj 2016.
17. https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1431694359-0-ntmpmckompoziti_15_1.pdf, srpanj 2016.
18. http://documents.tips/documents/08-kompoziti.html, srpanj 2016.
19. http://www.fibre-reinforced-plastic.com/2010/12/sandwich-composite-and-core-material.html, srpanj 2016.
20. http://kompozit-kemija.hr/portfolio-posts/karbonska-vlakna, srpanj 2016.
21. http://www.gizmag.com/cnt-composite-carbon-fiber-alternative/24593/, srpanj 2016.
22. http://www.ncl.ac.uk/newrail/assets/docs/FinalReport-Aerospace.pdf, srpanj 2016.
23. http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_042.html, kolovoz 2016.
24. http://www.mycity-military.com/Avioni/Boeing-787-Dreamliner.html, srpanj 2016.
25. http://www.appropedia.org/images/d/d7/Composites01.jpg, srpanj 2016.
26. http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/innovation/, srpanj 2016.
27. https://www.coursehero.com/file/p4rgj0j0/Commonly-Used-Pre-Impregnated-with-Epoxy-Pre-Pregs-Fiber-Direction-Control-of/, srpanj 2016.

28. http://hr.irt3000.si/vijesti/?id=157, srpanj 2016.
29. http://www.planeandpilotmag.com/article/pipistrel-panthera/#.V5tLJriLS00,srpanj 2016.
30. http://www.pipistrel.si/plane/panthera/overview, srpanj 2016.

POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela kompozita s obzirom na matricu i ojačala 11
Slika 2. Podjela kompozita prema ojačalu: a) kompozit ojačan česticama, b) kompozit ojačan vlaknima, c) strukturni kompoziti 14
Slika 3. Prikaz kompozita ojačanih vlaknima 15
Slika 4. Bakreni kompozit ojačan disperziranim česticama 22
Slika 5. Sendvič konstrukcija 24
Slika 6. Raspodjela materijala uzduž zrakoplova Boeing 787 Dreamliner 31
Slika 7. Raspodjela materijala na zrakoplovu A380-800 33
Slika 8. Pipistrel Pantera 34

POPIS GRAFIKONA

Grafikon 1. Ovisnost vlačnog i tlačnog naprezanja o čvrstoći 17
Grafikon 2. Postotak kompozitnih materijala na zrakoplovima 30

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva pojedinih vrsta vlakana 16

METAPODACI

Naslov rada: _Uloga kompozitnih materijala u konstrukciji letjelica_____

Student: _Sara Vučemilović Grgić_____

Mentor: _doc. dr. sc. Andrija Vidović_____

Naslov na drugom jeziku (engleski):

_Role of composite materials in aircraft construction_____

Povjerenstvo za obranu:

- __prof. dr. sc. Sanja Steiner_____ predsjednik
- __doc. dr. sc. Andrija Vidović_____ mentor
- __mr. sc. Miroslav Borković_____ član
- __prof. dr. sc. Stanislav Pavlin_____ zamjena

Ustanova koja je dodijelila akademski stupanj: Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu

Zavod: _Zavod za zračni promet_____

Vrsta studija: Preddiplomski _____

Studij: _Promet_____

Datum obrane završnog rada:___13. rujna 2016._____

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJČESTITOSTI 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 na čin, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne kr ši bilo čija autorska prava.

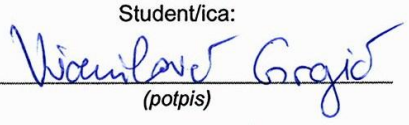
Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskori šten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog rada pod naslovom **Uloga kompozitnih materijala u konstrukciji letjelice**

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

U Zagrebu, 1.9.2016

Student/ica:



(potpis)