

# IZRADA KOMPOZITNIH LISTOVA PERAJA

---

**Radman, Ante**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split / Sveučilište u Splitu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:163951>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-28**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Specijalistički diplomski stručni studij Strojarsvo

**ANTE RADMAN**

**ZAVRŠNI RAD**

**IZRADA KOMPOZITNIH LISTOVA PERAJA**

Split, srpanj 2021.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Specijalistički diplomski stručni studij Strojstvo

**Predmet:** Dizajn plastičnih proizvoda

**Z A V R Š N I R A D**

**Kandidat:** Ante Radman

**Naslov rada:** Izrada kompozitnih listova peraja

**Mentor:** Danijela Pezer, predavač

Split, srpanj 2021.

**REPUBLIKA HRVATSKA**  
**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**Sveučilišni odjel za stručne studije**

**Studij:** Strojarstvo  
**Predmet:** Dizajn plastičnih proizvoda  
**Nastavnik:** Danijela Pezer, predavač

## **ZADATAK**

**Kandidat:** Ante Radman

**Zadatak:** Izrada kompozitnih listova peraja

U radu je potrebno:

- Opisati kompozite ojačane vlaknima, te načine ojačavanja;
- Navesti postupke izrade kompozita, te opisati postupak ručnog laminiranja;
- Oblikovati osnovni oblik peraja;
- Izraditi kalup za izradu listova peraja postupkom ručnog laminiranja
- Opisati izradu kompozitnih listova peraja postupkom ručnog laminiranja;
- Izvršiti analizu naprežanja u listu metodom konačnih elemenata (MKE);
- Analizirati izrađene kompozitne listove peraja.

## Sažetak

Ovaj završni rad bavi se izradom kompozitnih listova peraja proizvodnim procesom ručnog laminiranja. U uvodnom dijelu rada opisane su vrste, te performanse peraja. Također, opisani su kompozitni materijali s naglaskom na polimere ojačane staklenim i ugljičnim vlaknima koji se koriste za izradu. U praktičnom dijelu rada, prikazan je kompletan proces izrade kompozitnih listova peraja proizvodnim procesom ručnog laminiranja, koji se sastoji od oblikovanja listova, konstrukcije i izrade kalupa, do izrade konačnog proizvoda. U posljednjem poglavlju dana je analiza postignutih rezultata.

Ključne riječi: kompozitni materijal, peraje, staklena vlakna, ugljična vlakna, innegra vlakna, epoksidna smola, ručno laminiranje.

## Summary (Making a composite fin blades)

This final paper deals with the production of composite fin blades by hand lay-up production process. In the initial part of the paper, the type and performance of fins are written. Composite materials with an emphasis on glass and carbon fibre reinforced polymers used for manufacturing are also described. In practical part of the paper, the complete process of making composite fin blades with hand lay-up production process, consisting of desinging fins, construction of mould, is presented until the final product is made. In the last chapter an analysis of the results achieved is presented.

Keywords: Composite material, fins, glass fibers, carbon fibers, innegra fibers, epoxy resin, hand lay-up.

**SADRŽAJ**

|  |    |
|--|----|
| Sažetak .....  | ii |
| Summary (Making a composite fin blades) .....            | ii |
| 1. Uvod .....  | 1  |
| 1.1 Peraje .....   | 1  |
| 1.1.1 Vrste peraja .....                                 | 2  |
| 1.1.1.1 Monoperaje .....                                 | 2  |
| 1.1.1.2 Stereo peraje.....                               | 3  |
| 1.1.2 Ispitivanje peraja .....                           | 8  |
| 2. Kompozitni materijali .....                           | 10 |
| 2.1 Kompoziti keramičke matrice (CMCs) .....             | 11 |
| 2.2 Kompoziti metalne matrice (MMCs) .....               | 12 |
| 3. Kompoziti polimerne matrice (PMCs).....               | 13 |
| 3.1 Matrica.....   | 13 |
| 3.1.1 Epoksidne smole .....                              | 14 |
| 3.1.2 Nezasićene poliesterske smole .....                | 15 |
| 3.1.3 PEEK.....  | 15 |
| 3.2 Ojačanje .....                                       | 16 |
| 3.2.1 Oblici ojačanja.....                               | 16 |
| 3.2.1.1 Ojačanje u obliku tkanina .....                  | 17 |
| 3.2.1.2 Tkanine od proširenih vlakana (Spread tow) ..... | 18 |
| 3.2.1.3 Predimpregnirane tkanine (Prepreg) .....         | 19 |
| 3.2.2 Vrste ojačavajućih vlakna .....                    | 20 |
| 3.2.2.1 Staklena vlakna .....                            | 20 |
| 3.2.2.2 Ugljična vlakna .....                            | 20 |
| 3.2.2.3 Innegra™ S vlakna.....                           | 22 |
| 3.2.2.4 Aramidna vlakna .....                            | 22 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.2.2.5 | Prirodna vlakna .....                                 | 22 |
| 3.3     | Proizvodni postupci kompozita polimerne matrice ..... | 23 |
| 3.3.1   | Ručno laminiranje .....                               | 23 |
| 3.3.2   | Naštrcavanje .....                                    | 24 |
| 3.3.3   | Namatanje.....  | 25 |
| 3.3.4   | Pultruzija .....                                      | 25 |
| 3.3.5   | Kalupljenje .....                                     | 26 |
| 3.3.6   | Podtlačno uljevanje smole (VIP) .....                 | 27 |
| 3.3.7   | Automatizirano polaganje ojačanja (ATP).....          | 28 |
| 3.3.8   | Autoklav procesi .....                                | 29 |
| 4.      | Metoda konačnih elemenata.....                        | 30 |
| 4.1     | Modeliranje, analiza i vizualizacija .....            | 30 |
| 5.      | Izrada kompozitnih listova .....                      | 32 |
| 5.1     | Oblikovanje kompozitnih listova.....                  | 32 |
| 5.2     | Izrada kalupa.....                                    | 33 |
| 5.3     | Plan laminiranja .....                                | 34 |
| 5.3.1   | Analiza konačnih elementa u programu Abaqus.....      | 34 |
| 5.3.1.1 | Rezultati analize.....                                | 38 |
| 5.3.2   | Plan laminiranja za staklena vlakna .....             | 40 |
| 5.4     | Materijali za izradu .....                            | 40 |
| 5.4.1   | Epoksidna smola .....                                 | 41 |
| 5.4.2   | Staklena vlakna .....                                 | 41 |
| 5.4.3   | Ugljična/Innega™ S vlakna .....                       | 42 |
| 5.5     | Izrada listova procesom ručnog laminiranja.....       | 44 |
| 5.6     | Završna obrada listova.....                           | 46 |
| 6.      | Rezultati .....                                       | 48 |
| 7.      | Zaključak.....  | 52 |

|                  |    |
|------------------|----|
| Literatura ..... | 53 |
| Prilozi .....    | 56 |



## Popis slika

|  |    |
|--|----|
| Slika 1.1 - Potrošnja snage i frekvencija zaveslaja pri plivanju s perajama i bez njih [1] .....         | 1  |
| Slika 1.2 - Potrošnja energije u ovisnosti o brzini plivanja za različite vrste peraja [2] .....         | 2  |
| Slika 1.3 - Monoperaje s kompozitnim listom [3] .....  | 3  |
| Slika 1.4 - Stereo peraje s kompozitnim listovima [4] .....  | 3  |
| Slika 1.5 - Kompozitni listovi stereo peraja [5] .....   | 4  |
| Slika 1.6 - Profili savijanja lista peraja .....   | 4  |
| Slika 1.7 - Dijagram ovisnosti elastične potencijalne energije o gustoći materijala [6] .....            | 5  |
| Slika 1.8 - Dijagram ovisnosti elastične potencijalne energije o Youngovom modulu elastičnosti [6] ..... | 5  |
| Slika 1.9 - Gumeni profili [7] .....   | 6  |
| Slika 1.10 - Stope kratkih tetiva [8] .....  | 7  |
| Slika 1.11 - Stope dugih tetiva [9] .....  | 7  |
| Slika 1.12 - Ispitivanje dinamičke čvrstoće peraja [10] .....  | 8  |
| Slika 1.13 - Uređaj za ispitivanje učinkovitosti peraja [11] .....                                       | 9  |
| Slika 2.1 - Usporedba kompozitnih materijala s čelikom i aluminijem [12] .....                           | 10 |
| Slika 2.2 - Kočioni disk od kompozita keramičke matrice [13] .....                                       | 11 |
| Slika 2.3 - Kočioni bubanj s potrošnom površinom od kompozita keramičke matrice [14] ...                 | 12 |
| Slika 3.1 - Udio materijala u ukupnoj težini zrakoplova Boeing 787 Dreamliner [15] .....                 | 13 |
| Slika 3.2 - Oblici ojačanja [18] .....   | 16 |
| Slika 3.3 - Namotana ugljična vlakna na špulu (tow) [19] .....   | 16 |
| Slika 3.4 - Najčešće vrste tkanja ojačavajućih tkanina [20] .....  | 17 |
| Slika 3.5 - Mat od staklenih vlakana [21] .....  | 17 |
| Slika 3.6 - Usporedba poprečnog presjeka obične i tkanine od proširenih vlakana (Spread tow) [22] .....  | 18 |
| Slika 3.7 - Usporedba obične i tkanine od proširenih vlakana (Spread tow) [23] .....                     | 18 |
| Slika 3.8 - Proces izrade predimpregnirane tkanine [24] .....  | 19 |
| Slika 3.9 - Proizvodnja ugljičnih vlakana od PAN-a [16] .....  | 21 |
| Slika 3.10 - Proizvodni proces ručnog laminiranja [27] .....   | 24 |
| Slika 3.11 - Proizvodni proces naštrcavanja [6] .....  | 24 |
| Slika 3.12 - Proizvodni proces namatanja [6] .....   | 25 |
| Slika 3.13 - Proizvodni proces pultruzije [6] .....  | 26 |
| Slika 3.14 - Proizvodni proces otvorenog kalupljenja [6] .....   | 27 |

|  |    |
|--|----|
| Slika 3.15 - Proizvodni proces podtlačnog ulijevanja smole [28].....                       | 28 |
| Slika 3.16 - Proizvodni proces automatiziranog polaganja ojačanja [6].....                 | 28 |
| Slika 3.17 - Autoklav proizvodni procesi [29].....   | 29 |
| Slika 4.1 - Naprezanja u listu .....   | 31 |
| Slika 5.1 - Odabrani oblik lista peraje.....   | 32 |
| Slika 5.2 - Rastavljeni kalup .....  | 33 |
| Slika 5.3 - Sastavljeni kalup.....   | 33 |
| Slika 5.4 - Model lista podijeljen na sekcije .....  | 35 |
| Slika 5.5 - Unošenje mehaničkih svojstva tkanine običnog tkanja od staklenih vlakana ..... | 35 |
| Slika 5.6 - Izrada laminata.....   | 36 |
| Slika 5.7 - Granični uvjeti i opterećenje na modelu .....                                  | 37 |
| Slika 5.8 - Model s generiranom mrežom ljuskastih elemenata .....                          | 37 |
| Slika 5.9 - Deformacija lista izrađenog od staklenih vlakana .....                         | 38 |
| Slika 5.10 - Naprezanja u listu od staklenih vlakana .....                                 | 38 |
| Slika 5.11 - Deformacija lista od ugljičnih i Innegra™ S vlakana.....                      | 39 |
| Slika 5.12 - Naprezanja u listu od ugljičnih i Innegra™ S vlakana .....                    | 39 |
| Slika 5.13 - Plan laminiranja, staklena vlakna .....                                       | 40 |
| Slika 5.14 - Plan laminiranja, ugljična i Innegra™ S vlakna .....                          | 40 |
| Slika 5.15 - Epoksidna smola i utvrđivač [31] .....  | 41 |
| Slika 5.16 - Jednoosno usmjerena tkanina od staklenih vlakana [33].....                    | 42 |
| Slika 5.17 - Obično tkana tkanina od staklenih vlakana [34].....                           | 42 |
| Slika 5.18 - Jednoosno usmjerena tkanina od ugljičnih vlakana [35].....                    | 43 |
| Slika 5.19 - Hibridna tkanina od ugljičnih/ Innegra™ S vlakana [36] .....                  | 43 |
| Slika 5.20 - Karnuba vosak za odvajanje kalupa [38].....                                   | 44 |
| Slika 5.21 - Ručno laminiranje tkanina od staklenih vlakana, prvi sloj.....                | 45 |
| Slika 5.22 - Ručno laminiranje tkanina od staklenih vlakana, predzadnji sloj .....         | 45 |
| Slika 5.23 - Ručno laminiranje tkanina od ugljičnih i i Innegra™ S vlakana.....            | 45 |
| Slika 5.24 - Curenje viška smole iz kalupa .....   | 46 |
| Slika 5.25 - Izrađeni listovi .....  | 47 |
| Slika 5.26 - Obradjeni listovi peraja.....   | 47 |
| Slika 6.1 - Površina lista peraje od kompozita ojačanog staklenih vlaknima .....           | 48 |
| Slika 6.2 - Površinske greške na listu.....  | 49 |
| Slika 6.3 - Profili savijanja izrađenih listova prilikom korištenja u moru [39].....       | 49 |

---

|  |    |
|--|----|
| Slika 6.4 - Stereo peraje s kompozitnim listovima ojačanim ugljičnim i Innegra™ S vlaknima .....             | 50 |
| Slika 6.5 - Stereo peraje s kompozitnim listovima ojačanim ugljičnim i Innegra™ S vlaknima, testiranje ..... | 50 |
| Slika 6.6 - Peraja od staklenih vlakana .....  | 50 |
| Slika 6.7 - Poboljšani plan laminiranja .....  | 51 |

**Popis tablica**

|  |    |
|--|----|
| Tablica 3.1 - Svojstva epoksidnih smola [16] .....                                       | 14 |
| Tablica 3.2 - Svojstva poliesterskih smola [17] .....                                    | 15 |
| Tablica 3.3 - Svojstva PEEK termoplasta [16] .....                                       | 15 |
| Tablica 3.4 - Svojstva E i S-2 staklenih vlakana [25] .....                              | 20 |
| Tablica 3.5 - Svojstva raznih ugljičnih vlakana [26] .....                               | 21 |
| Tablica 3.6 - Svojstva pojedinih aramidnih vlakna [6] .....                              | 22 |
| Tablica 3.7 - Svojstva lana [6] .....  | 23 |
| Tablica 5.1 - Karakteristike West System 105/206 epoksidne smole i utvrđivača [32] ..... | 41 |
| Tablica 5.2 - Mehanička svojstva ugljičnih vlakana Toray Torayca® T700SC [35] .....      | 43 |
| Tablica 5.3 - Mehanička svojstva Innegra™ S 940 vlakana [37] .....                       | 43 |
| Tablica 6.1 - Težine ojačavajućih tkanina, ovisno o težini korisnika .....               | 51 |

## 1. Uvod

Cilj ovog rada je prikazati kompletan proces izrade i oblikovanja kompozita polimerne matrice, na primjeru listova peraja.

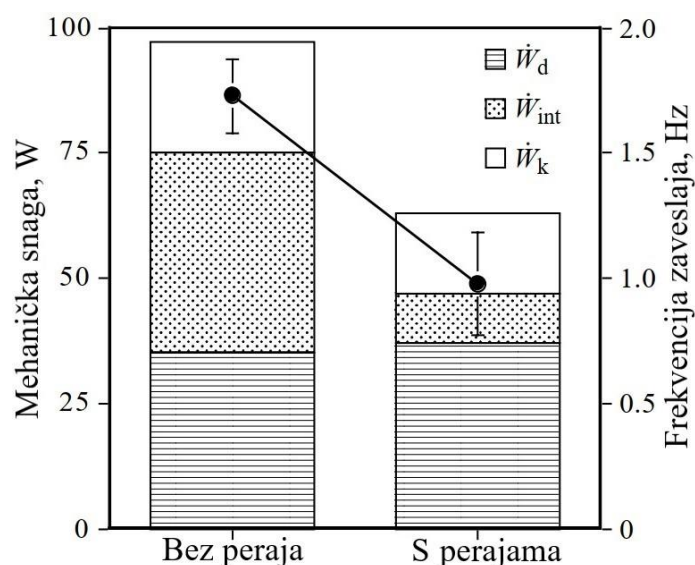
U prvom dijelu rada opisane su peraje i kompoziti s naglaskom na kompozite polimerne matrice. Također su detaljno prikazani proizvodni procesi i računalne analize.

U drugom dijelu rada prikazan je kompletan proces izrade kompozitnih listova, od oblikovanja do same izrade i testiranja.

U završnom dijelu rada dana je analiza postignutih rezultata.

### 1.1 Peraje

Peraje su osnovni dio opreme za plivanje i ronjenje. Pri zaveslaju, peraje odguruju vodu, što generira odgovarajući potisak i gura korisnika. Na slici 1.1 prikazana je usporedba plivanja pri konstantnoj brzini s perajama i bez njih. Može se uočiti da rad koji se mora obaviti kako bi se ubrzali i usporili udovi u odnosu na središte mase  $\dot{W}_{int}$  i rad koji ne doprinosi potisku  $\dot{W}_k$ , manji u slučaju korištenja peraja.



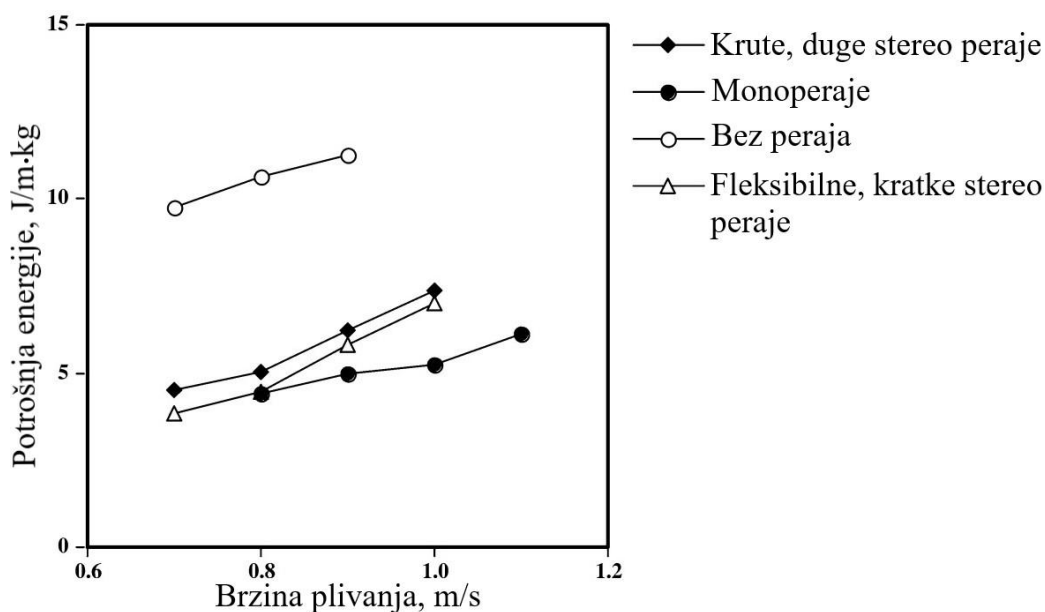
Slika 1.1 - Potrošnja snage i frekvencija zaveslaja pri plivanju s perajama i bez njih [1]

Frekvencija zaveslaja ima najveći utjecaj na potrošnju energije i kisika. Peraje omogućuju manju frekvenciju zaveslaja, što povećava učinkovitost u kretanju kroz vodu. Rezultat korištenja peraja je veća pokretljivost, te manja potrošnja energije i kisika.

### 1.1.1 Vrste peraja

Trenutno, na tržištu je dostupno puno različitih peraja, koje zahtijevaju različite tehnike korištenja. Peraje možemo podijeliti na: monoperaje i stereo peraje.

Na slici 1.2 prikazana je potrošnja energije u ovisnosti o brzini plivanja za različite vrste peraja. Može se uočiti da je plivanje s monoperajama najučinkovitije. Također, kratke stereo peraje imaju malo bolju učinkovitost od dugih, što je u ovom slučaju najviše zbog velike razlike u njihovoj težini.



Slika 1.2 - Potrošnja energije u ovisnosti o brzini plivanja za različite vrste peraja [2]

Najznačajniji faktori o kojima ovisi učinkovitost peraja su:

- težina,
- vrsta materijala lista,
- površina lista.

#### 1.1.1.1 Monoperaje

Monoperaje se sastoje od lista i stopa, u koje se pričvršćuju obje noge korisnika. List je varijabilne savojne krutosti, najčešće izrađen od kompozita polimerne matrice. Na slici 1.3 prikazana je monoperaja s listom izrađenim od kompozita polimerne matrice.

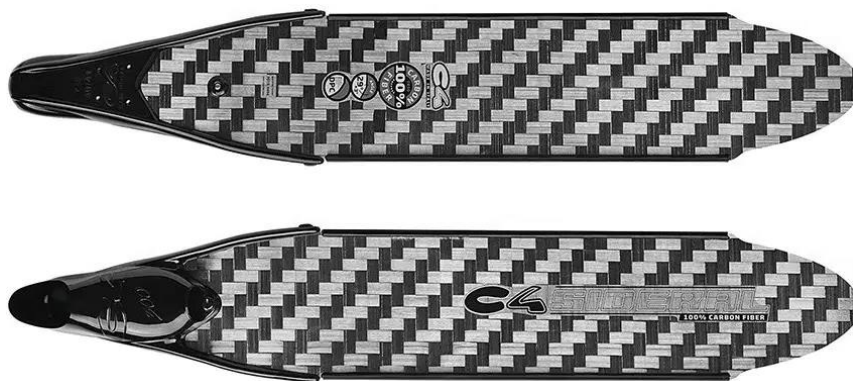
Plivanje s monoperajama je učinkovitije i omogućuje veću brzinu naspram stereo peraja. Mana monoperaja je smanjena pokretljivost jer su noge korisnika skupa spojene u stopi. Također, cijena monoperaja je približno duplo veća od stereo peraja za isti materijal lista.



Slika 1.3 - Monoperaje s kompozitnim listom [3]

#### 1.1.1.2 Stereo peraje

Stereo peraje se sastoje od lista, vodilica i stopa. Na slici 1.4 prikazane su stereo peraje s kompozitnim listovima



Slika 1.4 - Stereo peraje s kompozitnim listovima [4]

Najveći udio na performanse stereo peraja imaju listovi. Listovi su dostupni u raznim dužinama, širinama, težini i savojnoj krutosti. Oblik listova najviše ovisi o vrsti primjene. Na primjer, kratki, široki i kruti listovi koriste se kada je potreban maksimalan potisak na kratko vrijeme.

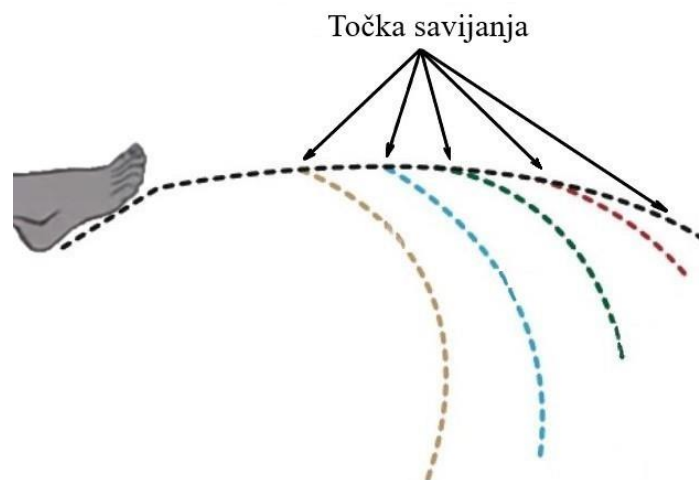
Povećanjem površine lista povećava se učinkovitost, jer je potrebna manja frekvencija zaveslaja. Istodobno, povećanjem površine lista povećava se sila otpora prilikom plivanja, što rezultira povećanom potrošnjom energije. Na slici 1.5 prikazani su kompozitni listovi stereo peraja.



Slika 1.5 - Kompozitni listovi stereo peraja [5]

Listovi peraja se izrađuju od duromera ili od kompozita polimerne matrice. Duromerni listovi se izrađuju proizvodnim postupkom injekcijskog prešanja, dok se kompozitni listovi mogu izraditi raznim postupcima izrade kompozita. Kod kompozitnih listova ojačanje je u obliku tkanina, najčešće od ugljičnih, staklenih, aramidnih i sintetskih vlakana.

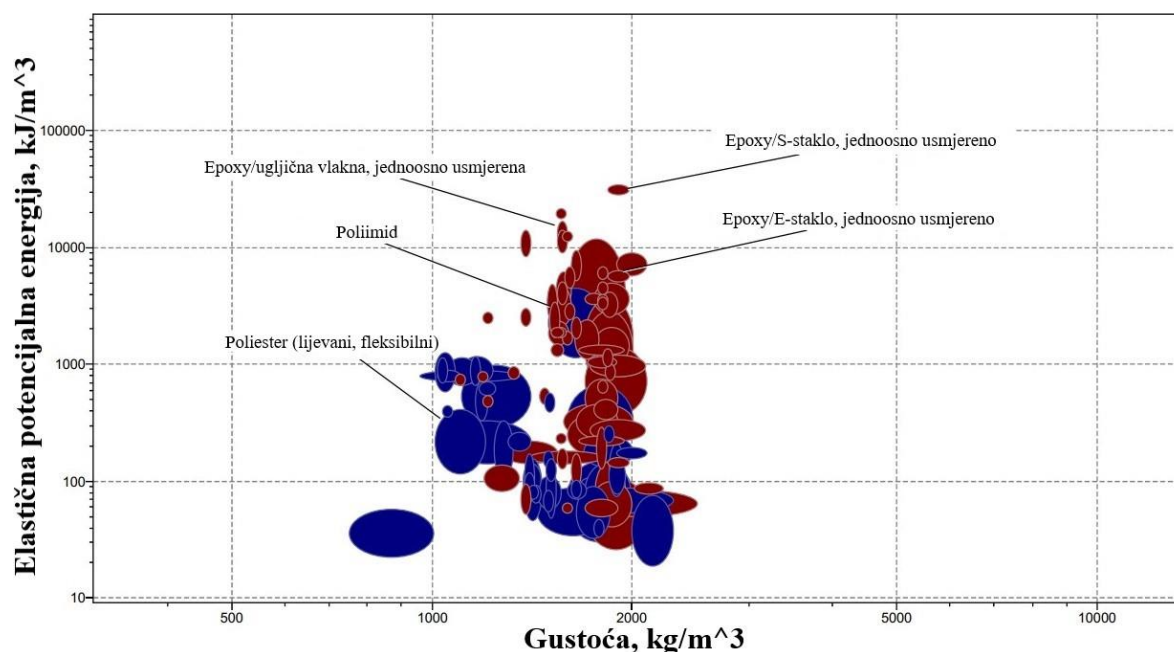
S kompozitnim listovima lakše je postići varijabilnu savojnu krutost, koja je ključna za performanse peraja. Kompozitni listovi se izrađuju tako da imaju visoku savojnu krutost na početku lista (dio koji se spaja sa stopom), te koja se postepeno smanjuje prema kraju lista. Navedeno omogućuje izradu različitih profila savijanja za različite tehnike korištenja. Na slici 1.6 prikazani su razni profili savijanja kompozitnog lista.



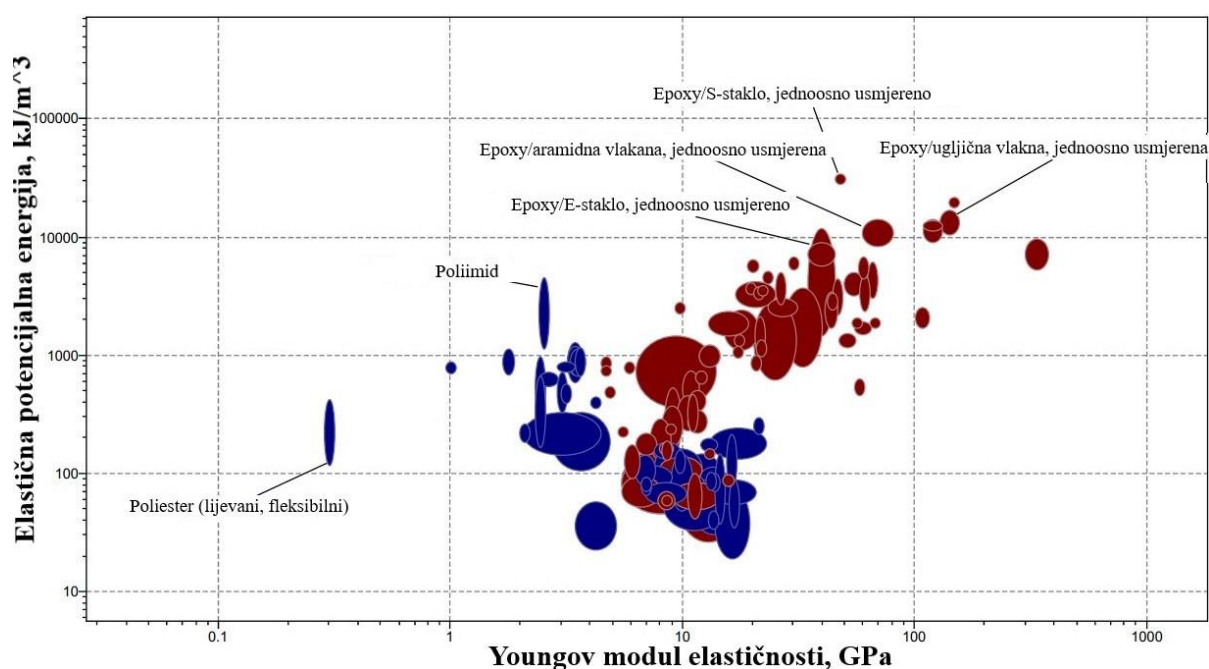
Slika 1.6 - Profili savijanja lista peraja



Kompozitni listovi naspram duromernih imaju bolju učinkovitost, bolji odaziv i manju težinu. Izvršne performanse su rezultat visoke elastične potencijalne energije kompozita polimerne matrice. Mana kompozitnih listova je veća cijena (do 10 puta) i lakša lomljivost od onih napravljenih do duromera. Na slici 1.7 prikazan je dijagram ovisnosti elastične potencijalne energije o gustoći materijala. Na slici 1.8 prikazan je dijagram ovisnosti elastične potencijalne energije o Youngovom modulu elastičnosti materijala.



Slika 1.7 - Dijagram ovisnosti elastične potencijalne energije o gustoći materijala [6]



Slika 1.8 - Dijagram ovisnosti elastične potencijalne energije o Youngovom modulu elastičnosti [6]

Plavom bojom u dijagramima su označeni duromeri, a crvenom kompoziti polimerne matrice. Iz priloženih dijagrama uočava se izrazita superiornost mehaničkih svojstava kompozita polimerne matrice nad duromerima.

Gumeni profili, prikazani na slici 1.9 lijepe se, najčešće cijanoakrilatima, na rubove listova. Svrha gumenih profila prikazanih lijevo na slici je:

- usmjeravanje vode niz list,
- otežavanje lateralnog pomicanja peraja,
- zaštita rubova lista.

Desno prikazani profili lijepe se na rubove listova radi zaštite i postavljanja tetiva stopa.



*Slika 1.9 - Gumeni profili [7]*

Pojedini proizvođači ne koriste gumene profile konstantnog poprečnog presjeka, već varijabilnog. Ukoliko su na listovima zalijepljeni previsoki gumeni profili, može doći do bržeg zamora korisnika.

Stope su sastavni dio stereo peraja, a služe za prijenos snage od korisnika na listove. Spajaju se s listovima pomoću ljepila ili vijaka. U slučaju da se spajaju s ljepilom teško ih je naknadno ukloniti. Prednost montiranja stopa pomoću vijaka je mogućnost naknadnog uklanjanja, a mana je da se listovi moraju probušiti, što može dovesti do neželjene koncentracije naprezanja.

Stope se izrađuju od raznih termoplasta proizvodnim postupkom injekcijskog prešanja. Pojedine stope se izrađuju kombinacijom termoplasta i prirodne gume.

Vrlo važna karakteristika stopa su tetive. Tetive imaju veliku ulogu u profilu savijanja lista. Ako su tetive veće debljine i duljine, negativno utječu na performanse peraja. Materijali od kojih se stope izrađuju imaju dosta lošije svojstvo elastične potencijalne energije naspram listova izrađenih od kompozita polimerne matrice. Zbog toga zadnjih godina proizvođači smanjuju duljinu i debljinu tetiva, a pojedini modeli ih uopće nemaju. Na slici 1.10 prikazane su stope kratkih tetiva, a na slici 1.11 prikazane su stope dugih tetiva.



*Slika 1.10 - Stope kratkih tetiva [8]*



*Slika 1.11 - Stope dugih tetiva [9]*

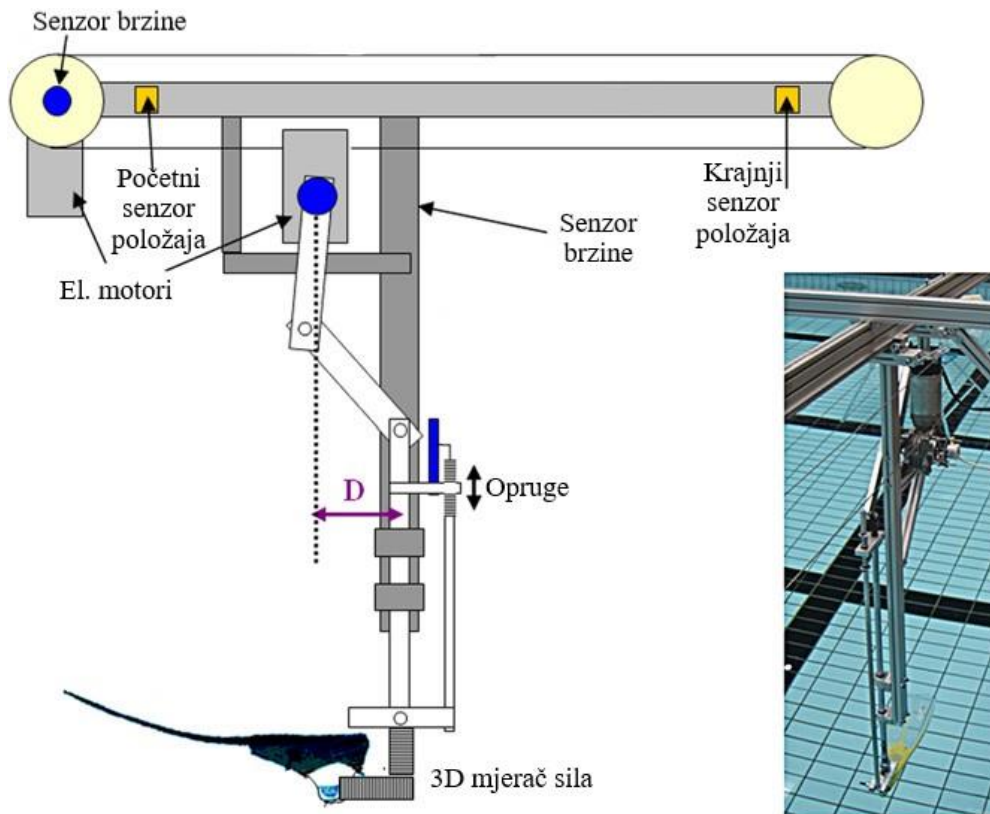
### 1.1.2 Ispitivanje peraja

Ispitivanje peraja se može podijeliti na ispitivanje dinamičke čvrstoće i ispitivanje učinkovitosti. Ispitivanje dinamičke čvrstoće najčešće se provodi samo kod listova izrađenih od kompozita polimerne matrice. To je zbog veće vjerojatnosti loma lista radi greške u proizvodnom procesu. Obično svaki pojedini proizvođač ima svoj jedinstveni uređaj za ispitivanje. Na slici 1.12 prikazano je ispitivanje dinamičke čvrstoće peraja s kompozitnim listom.



*Slika 1.12 - Ispitivanje dinamičke čvrstoće peraja [10]*

Ispitivanje učinkovitosti peraja je svakako puno kompliciraniji proces od ispitivanja dinamičke čvrstoće. Kod izrade uređaja za ispitivanje u obzir se mora uzeti mnogo faktora, od pravilnog reproduciranja kretanja ljudske noge, do utjecaja brzine strujanja vode. Na slici 1.13 prikazan je uređaj za ispitivanje učinkovitosti peraja.



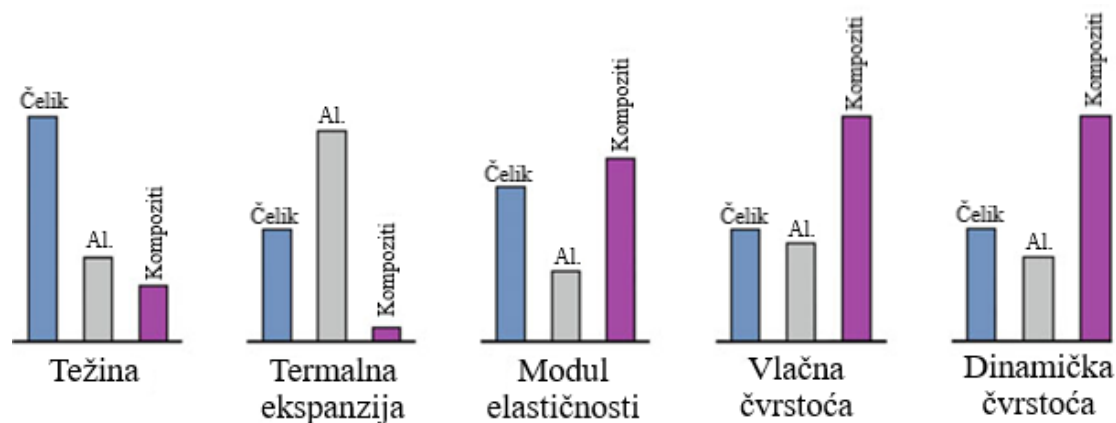
Slika 1.13 - Uređaj za ispitivanje učinkovitosti peraja [11]

## 2. Kompozitni materijali

Kompozitni materijal se može definirati kao materijal koji se sastoji od minimalno dva ili više različita materijala. Kompozitni materijal možemo podijeliti na dvije faze, matricu i ojačanje. Svrha matrice je pružanje oblika kompozitu, omogućavanje prijenosa opterećenja na ojačanje i zaštita ojačanja od vanjskih utjecaja. Svrha ojačanja je osiguranje čvrstoće, krutosti i ostalih mehaničkih svojstava kompozita.

Kompozitni materijali su anizotropni, svojstva im ovise o orijentaciji ojačavajućih vlakana. U pojedinim slučajevima (kod upotrebe mljevenih vlakana kao ojačanje), kompozitni materijal može biti izotropan.

Mehanička svojstva kompozitnih materijala su superiornija naspram homogenih materijala. Na slici 2.1 prikazana je usporedba kompozitnih materijala s čelikom i aluminijem. Osim male težine i odličnih mehaničkih svojstava, najznačajnija prednost kompozitnih materijala je mogućnost prilagođavanja svojstava. To se postiže kombiniranjem i mijenjanjem orijentacije ojačavajućih vlakana. Glavni nedostaci upotrebe kompozitnih materijala su visoka cijena i kompliciranost proizvodnje.



Slika 2.1 - Usporedba kompozitnih materijala s čelikom i aluminijem [12]

Kompoziti se najčešće dijele po vrsti matrice, i to na:

- kompozite keramičke matrice (CMCs),
- kompozite metalne matrice (MMCs),
- kompozite polimerne matrice (PMCs).



## 2.1 Kompoziti keramičke matrice (CMCs)

Odlična značajka keramika je da imaju visoku čvrstoću i visok Youngov modul elastičnosti pri povišenim temperaturama. Međutim, krhke su i imaju nisku lomnu žilavost. Dodavanjem vlakana iskorištavaju se odlična mehanička svojstva pri povišenim temperaturama bez rizika loma. Također, povećava se otpornost od toplinskog šoka, što je važno svojstvo za materijal koji će vrlo vjerojatno proći kroz mnogo toplinskih ciklusa. Za razliku od polimernih i metalnih matrica, keramičke matrice imaju niže produljenje do loma nego ojačavajuća vlakna. Zbog toga lom kompozita pokreće lom matrice.

Kao vlakna koriste se samo ona koja su stabilna na temperaturama višim od 1000 °C. A, često se koriste vlakna od aluminijevog oksida, porcelanita, silicijevog karbida, cirkonija i ugljika. Kao materijal matrice često se koristi aluminijev oksid, silicijev karbid, aluminijev nitrid, silicijev nitrid i cirkonij. Najčešći proizvodi postupci dobivanja kompozita keramičke matrice su: sinteriranje, piroliza i kemijsko prevlačenje iz parne faze (CVD).

Kompoziti keramičke matrice primjenjuju se u slučajevima gdje su potrebna odlična mehanička svojstva pri povišenim temperaturama. Neke od primjena su: toplinski štitovi u svemirskim letjelicama, razne komponente plinskih turbina, klizni ležaji, plamenici, rezni alati i kočioni diskovi automobila i motocikala. Na slici 2.2 prikazan je automobilski kočioni disk izrađen od kompozita keramičke matrice. Matrica je na silicijev karbid, a ojačanje su kratko sjeckana ugljična vlakna.



Slika 2.2 - Kočioni disk od kompozita keramičke matrice [13]

## 2.2 Kompoziti metalne matrice (MMCs)

Kompoziti metalne matrice se sastoje od matrice (legura) i ojačanja u obliku vlakana. Dodavanjem vlakana metalnoj matrici poboljšavaju se mehanička svojstva. Matrica doprinosi visok udio čvrstoće kompozita.

Kao materijal matrice primjenjuju se legure od: titana, magnezija, aluminija, kobalta, bakara i berilija. Ojačavajuća vlakna mogu biti diskontinuirana i kontinuirana. Primjenjuju se vlakna od: ugljika, aluminijevog oksida i silicijevog karbida.

Proizvodni procesi kompozita keramičke matrice mogu se odvijati u tekućem, krutom i plinovitom stanju. U tekućem stanju primjenjuju se razni postupci lijevanja. U krutom stanju primjenjuju se razni postupci prešanja. U plinovitom stanju primjenjuje se fizikalni postupak nanošenja prevlaka iz parne faze (PVD).

Kompoziti metalne matrice primjenjuju se u raznim dijelovima motora s unutrašnjim izgaranjem, pogonskim vratilima, dijelovima svemirskih letjelica, dalekovodnim vodičima, automobilskim kočionim diskovima, itd. Na slici 2.3 prikazan je kamionski kočioni bubanj, kućišta izrađenog od legure aluminija i potrošne površine izrađene od kompozita metalne matrice. Matrica je legura aluminija, a ojačanje mljevena vlakna od silicijevog karbida. Kočioni bubanj je lakši i brže odvodi toplinu od onog izrađenog u cijelosti od lijevanog željeza.

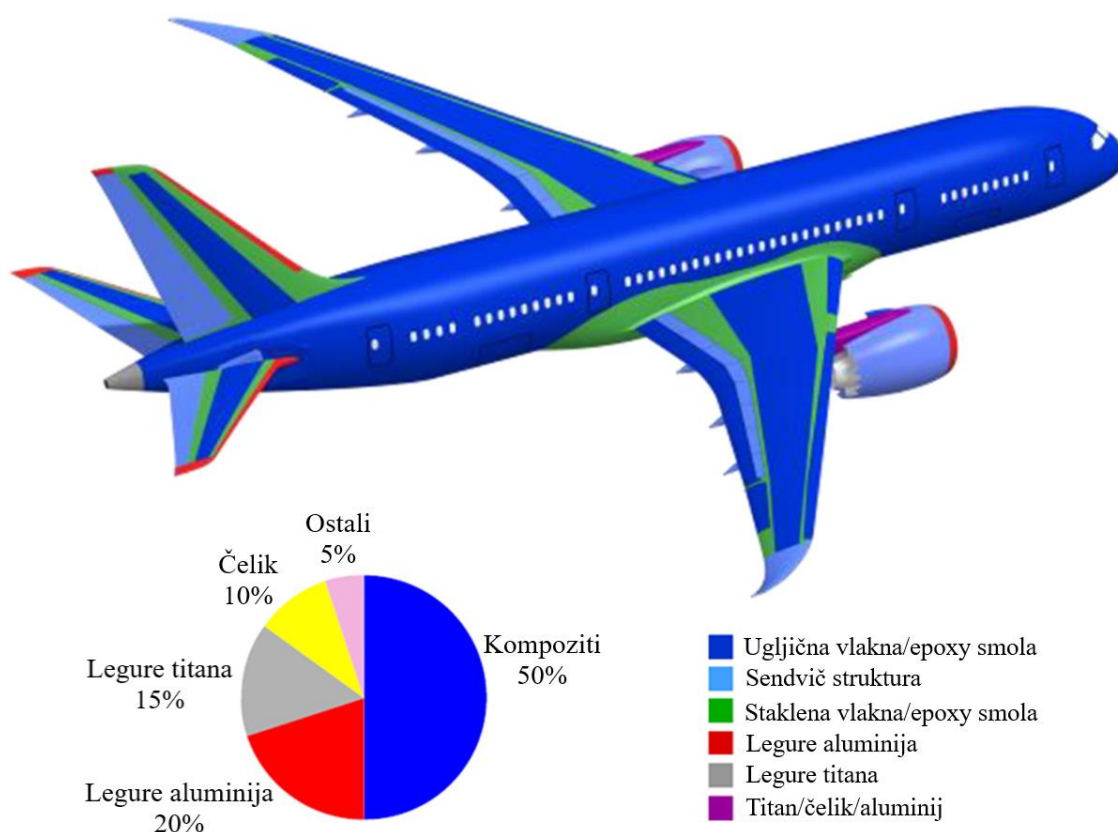


*Slika 2.3 - Kočioni bubanj s potrošnom površinom od kompozita keramičke matrice [14]*



### 3. Kompoziti polimerne matrice (PMCs)

Kompoziti polimerne matrice su najkorištenija vrsta kompozita. Razlog visoke primjene su odlična mehanička svojstva, mala težina i relativno jednostavna proizvodnja. Sastoje se od matrice, koja je najčešće u obliku smole i ojačavajućih vlakana, koja mogu biti diskontinuirana ili kontinuirana. Na slici 3.1 prikazan je udio materijala u ukupnoj težini zrakoplova Boeing 787 Dreamliner. Može se uočiti visok udio primjene kompozita polimerne matrice.



Slika 3.1 - Udio materijala u ukupnoj težini zrakoplova Boeing 787 Dreamliner [15]

#### 3.1 Matrica

Dvije vrste polimera se koriste kao materijal matrice, termoplasti i duromeri. Duromeri se stvrdnjavaju u krutinu dodavanjem utvrđivača (katalizatora) koji pokreće nepovratnu kemijsku reakciju i/ili dodavanjem topline i pritiska. Termoplasti su već u krutom obliku, te se samo mogu oblikovati dodavanjem topline i pritiska. Kod njih proces oblikovanja može se ponavljati ponovnim dodavanjem topline.

Duromerne matrice su korištenije od termoplastnih zbog lakše mogućnosti oblikovanja, te su najčešće u obliku smola. Najkorištenije duromerne smole su nezasićena poliesterska, epoksidna, maleimidna, cijnat esterska, fenolna i vinilesterska.

Termoplasti se najčešće koriste u obliku već predimpregniranih ojačanja (Prepreg). Najkorišteniji termoplasti za matrice su: PEEK, poliamid i polieterimid.

### 3.1.1 Epoksidne smole

Epoksidna smola je jedna od najkorištenijih duromernih matrica. Epoksid je polimer koji se sastoji od epoksidne skupine koja sadrži jedan atom kisika i dva atoma ugljika u svojoj kemijskoj strukturi.

Česti primjer smole je DGBA, organska tekućina niske molekularne težine, koja sadrži dvije epoksidne skupine. Razni aditivi se dodavaju smoli za mijenjanje viskoznosti, fleksibilnosti i visine zaštite od UV zračenja.

Sredstva za otvrdnjavanje smole su organski amino ili kiseline spojevi. Svojstva smole ovise o gustoći umrežavanja poprečnih veza. Česti utvrđivač za DGBA smolu je dietilenetriamin (DETA). Općenito se dodaje 10-20% utvrđivača smoli. Brzina stvrdnjavanja ovisi o radnoj temperaturi, količini zamiješane smole i samoj vrsti utvrđivača. Porastom sobne temperature ubrzava se proces stvrdnjavanja. Također, miješanjem veće količine smole odjednom, proces stvrdnjavanja se ubrzava [16].

Epoksidne smole zbog odličnih kemijskih i mehaničkih svojstava kombiniranih s jednostavnim oblikovanjem imaju visoku primjenu. Epoksidne smole su nekoliko puta skuplje od nezasićenih poliesterski, ali imaju bolju otpornost na vlagu, niže skupljanje pri stvrdnjavanju i bolja mehanička svojstva. U tablici 3.1 prikazana su svojstva epoksidnih smola.

Tablica 3.1 - Svojstva epoksidnih smola [16]

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| Gustoća, g/cm <sup>3</sup>      | 1.2 ÷ 1.3 |
| Vlačna čvrstoća, MPa            | 50 ÷ 125  |
| Youngov modul elastičnosti, GPa | 2.5 ÷ 4   |
| Skupljanje pri stvrdnjavanju, % | 1 ÷ 5     |
| Vlačno istezanje, %             | 1 ÷ 6     |
| Maks. temp. korištenja, °C      | 120 ÷ 130 |

### 3.1.2 Nezasićene poliesterske smole

Nezasićena poliesterska smola dobiva se kondenzacijskom polimerizacijom različitih glikola (alkohola) i dvobaznih kiselina (npr. maleinske kiseline ili fumarne kiseline). Zasićene kiseline, poput izoftalne ili ortohtalne dodaju se radi modificiranja kemijske strukture između mjesta umrežavanja. Dobivena polimerna tekućina otapa se u reaktivnom razrjeđivaču, kao što je stiren. Stiren smanjuje viskoznost na razinu prikladnu za impregnaciju ili laminiranje. Katalizator, najčešće MEKP, se koristi za pokretanje kemijske reakcije.

Stvrdnuta poliesterska smola ima amfornu strukturu. Poliesterske smole mogu biti formulirane za različita svojstva, od tvrdih i krutih do mekih i fleksibilnih. Svojstva kao i kod epoksidnih ovise o gustoći umrežavanja poprečnih veza u strukturi. Prednosti poliesterskih smola su niska viskoznost i niska cijena, a nedostaci visoko skupljanje pri stvrdnjavanju [17]. U tablici 3.2 prikazana su svojstva nezasićenih poliesterskih smola.

Tablica 3.2 - Svojstva poliesterskih smola [17]

|                                 |              |
|---------------------------------|--------------|
| Gustoća, g/cm <sup>3</sup>      | 1.1 ÷ 1.43   |
| Vlačna čvrstoća, MPa            | 34.5 ÷ 103.5 |
| Youngov modul elastičnosti, GPa | 2.1 ÷ 3.45   |
| Skupljanje pri stvrdnjavanju, % | 5 ÷ 12       |
| Vlačno istezanje, %             | 1 ÷ 5        |
| Maks. temp. korištenja, °C      | 60 ÷ 80      |

### 3.1.3 PEEK

Poli(eter-eter-eton) (PEEK) je jedan od najkorištenijih termoplastnih matrica. Dodavanjem ojačavajućih vlakana povećava mu se kristalnost. Povećanjem kristalnosti povećavaju se mehanička svojstva. Prednosti su visoka temperatura korištenja, izrazito visoka lomna žilavost (50 ÷ 100 veća nego kod epoksidnih smola), niska apsorpcija vode i odlična otpornost na kemikalije. Nedostatak je visoka cijena i slaba komercijalna dostupnost [16]. U tablici 3.3 prikazana su svojstva PEEK termoplasta.

Tablica 3.3 - Svojstva PEEK termoplasta [16]

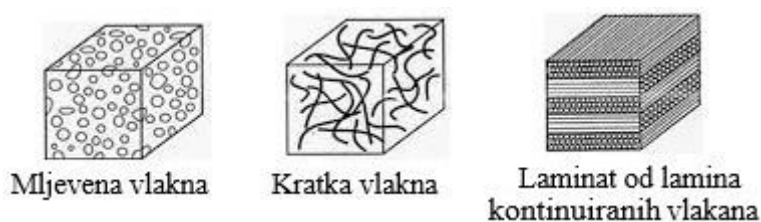
|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| Gustoća, g/cm <sup>3</sup>      | 1.3 ÷ 1.32 |
| Vlačna čvrstoća, MPa            | 100        |
| Youngov modul elastičnosti, GPa | 3.24       |
| Vlačno istezanje, %             | 50         |
| Maks. temp. korištenja, °C      | 250        |

## 3.2 Ojačanje

Ojačanje je sastavni dio kompozita polimerne matrice. Dodaje se polimernim matricama radi postizanja boljih mehaničkih, električkih, toplinskih i kemijskih svojstava.

### 3.2.1 Oblici ojačanja

Ojačanje može biti u obliku kontinuiranih, diskontinuiranih (sjeckanih) i mljevenih vlakana. Lamina je sloj matrice s kontinuiranim vlaknima, koja mogu biti orijentirana u različitim pravcima. Spoj dvije ili više lamina naziva se laminat. Na slici 3.2 prikazani su oblici ojačanja.



Slika 3.2 - Oblici ojačanja [18]

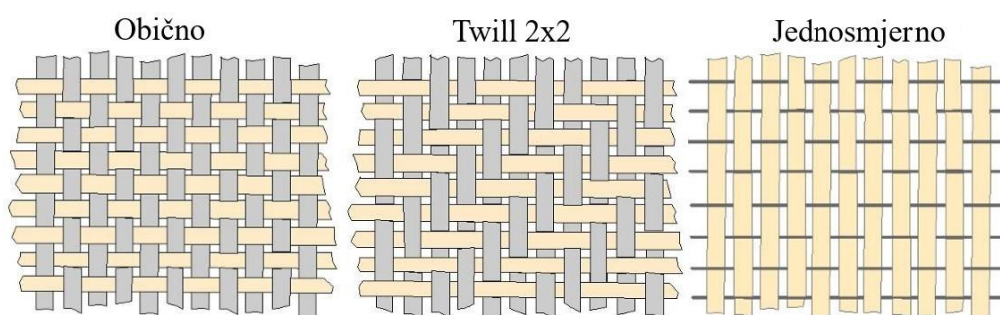
Početni oblik ojačanja je filament, koji se dobije ekstruzijom početne sirovine. Filament ima promjer od nekoliko mikrona i kao takav nema primjenu kao ojačanje. Spajanjem mnogo (nekoliko tisuća) filamenata dobiva se vlakno, koje se tada namata na špulu (Sl.3.3). Česti engleski naziv za taj namot vlakana je *roving* (staklena) ili *tow* (ugljična). Vlakna u tom obliku koriste se u raznim proizvodnim procesima kompozita, ali većinom za izradu raznih tkanina.



Slika 3.3 - Namotana ugljična vlakna na špulu (tow) [19]

### 3.2.1.1 Ojačanje u obliku tkanina

Tkanine predstavljaju najčešći oblik ojačanja kompozita polimerne matrice. Tkanine definiramo po vrsti tkanja, težini po metru kvadratnom i vrsti korištenih vlakana. Najčešća vrsta tkanja je obično, *twill* i satensko. Također, vlakna u tkaninama mogu biti usmjerena jednosmjerno ( $0^\circ$ ), dvoosno (npr.  $-45^\circ/+45^\circ$ ) ili višeosno. Težina komercijalno dostupnih tkanina kreće se od  $25 \text{ g/m}^2$  do  $2000 \text{ g/m}^2$ . Na slici 3.4 prikazane su najčešće vrste tkanja ojačavajućih tkanina.



Slika 3.4 - Najčešće vrste tkanja ojačavajućih tkanina [20]

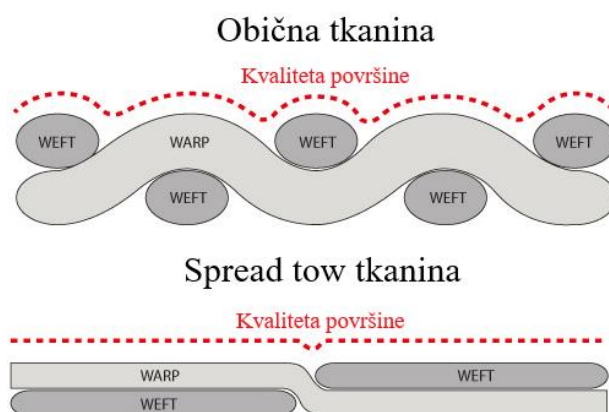
Ojačanje također može biti u obliku mata. Mat je netkana tkanina, s kontinuiranim ili diskontinuiranim vlaknima. Vlakna, najčešće od E-stakla, spojena su vezivom, da bi se dobila u obliku tkanine. Ojačanje u obliku mata ima lošija mehanička svojstva naspram tkanih tkanina. Cijena matova je dosta niža od tkanih tkanina. Na slici 3.5 prikazan je mat od diskontinuiranih staklenih vlakana.



Slika 3.5 - Mat od staklenih vlakana [21]

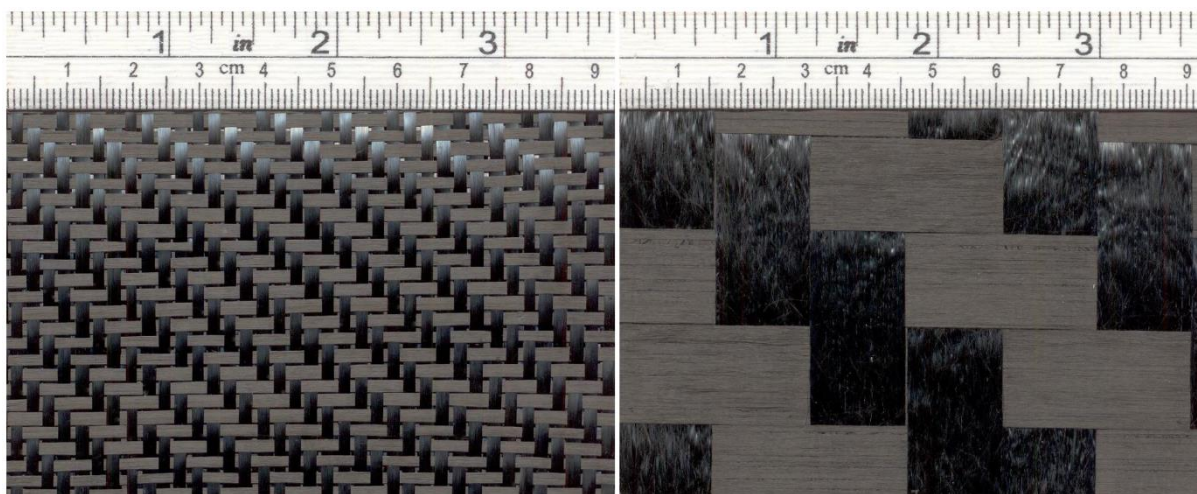
### 3.2.1.2 Tkanine od proširenih vlakana (*Spread tow*)

Tkanine od proširenih vlakana (*Spread tow*) su tkanine povećanih mehaničkih svojstava i smanjene težine. Izrađuju se od proširenih, plosnatih ojačavajućih vlakana. Širina standardnih vlakana iznosi od 1 mm do 5 mm, a kod proširenih i do 25 mm. Na slici 3.6 prikazana je usporedba poprečnog presjeka običnih i tkanina od proširenih vlakana. Može se uočiti da je korištenjem proširenih vlakana debljina kompozita manja, kvaliteta površine bolja, raspodjela vlakana ravnija i količina korištene smole manja. Mana im je viša cijena (skoro duplo) od ostalih tkanina i nemogućnost primjene na kompleksnije oblike.



Slika 3.6 - Usporedba poprečnog presjeka obične i tkanine od proširenih vlakana (*Spread tow*) [22]

Na slici 3.7 prikazana je usporedba obične i tkanine od proširenih vlakana koje imaju istu vrstu tkanja i istu težinu po metru kvadratnom.



Slika 3.7 - Usporedba obične i tkanine od proširenih vlakana (*Spread tow*) [23]

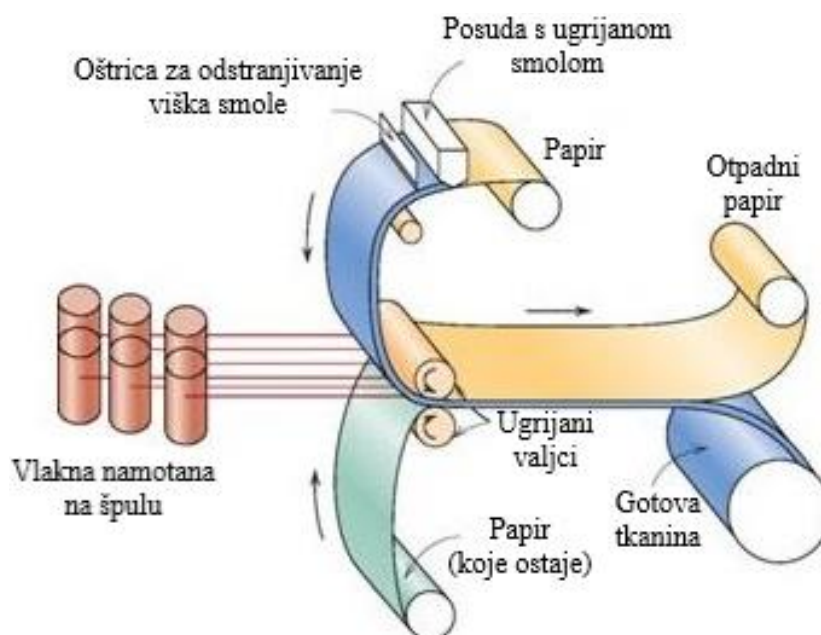


### 3.2.1.3 Predimpregnirane tkanine (Prepreg)

Predimpregnirane tkanine (Prepreg) u sebi već sadrže matricu, koja je često epoksidna smola. To znači da se nakon laminiranja tkanine, ne dodaje ni smola ni vlakna. Tkanina se stvrdnjava dodavanjem topline i pritiska. Prepreg tkanine se skladište u zamrzivačima (oko  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), jer bi se u protivnom započeo proces stvrdnjavanja. Trenutno, na tržištu postoje prepreg tkanine koje se mogu koristiti na sobnoj temperaturi pola godine bez vraćanja u zamrzivač.

Prednosti prepreg tkanina su visoka mehanička svojstva. To je zbog visokog masenog udjela vlakana (čak 75%) koji nije moguć ili je teško ostvariv upotrebom drugih tkanina i proizvodnih procesa. Primjena je jednostavna, tkanine su ljepljive, te se polažu jedna na drugu. Također osigurava se visoka kvaliteta površine i ponovljivost izrađenih proizvoda. Nedostaci prepreg tkanina su potrebno skladištenje u zamrzivaču i visoka cijena proizvodnih procesa (potreban autoklav ili peć).

Predimpregnirane tkanine najčešće se izrađuju tako da se na jedan ili dva papira nanosi tanak sloj smole. Papiri su premazani odvajanjem tako da se papir kasnije može odvojiti od tkanine. Tada između dva zagrijana valjka, papiri i ojačanje prolaze. Zbog pritiska i topline, smola u potpunosti natapa vlakna. Jedan sloj papira se uklanja, te se gotova tkanina namata na špulu. Moguća je izrada sa skoro svim vrstama ojačavajućih vlakana, raznih tkanja. Tkanina se također može izraditi tako da se vlakna uranjaju u kadu, a ne da se smola nanosi na papir. Na slici 3.8 prikazan je proces izrade predimpregnirane jednoosne tkanine.



Slika 3.8 - Proces izrade predimpregnirane jednoosne tkanine [24]

### 3.2.2 Vrste ojačavajućih vlakna

Vrste vlakana za ojačanje kompozita polimerne matrice su: staklena, ugljična, sintetska i prirodna.

#### 3.2.2.1 Staklena vlakna

Bazna sirovina za izradu staklenih vlakana je silicijev dioksid, koji ovisno o vrsti vlakna može iznositi 50 ÷ 65 % masenog udjela. Ostali materijali su razni oksidi čija vrsta i količina također ovise o vrsti vlakna. Vlakna se najčešće proizvode tako da se prvo sastojci pomiješaju, te se stavljaju u peć na taljenje (oko 1370 °C). Tada se otopljeno staklo provlači kroz grijane čahure od platine, te se dobivaju filamenti. Nakon toga filamenti se premazuju sredstvom koje ih veže zajedno, poboljšava impregnaciju i kompatibilnost sa smolama. Promjer filamenata kreće se od 5 do 25 mikrona.

Postoji više vrsti, a dvije najkorištenije vrste staklenih vlakana su E-staklo i S-staklo. S-staklo je razvijeno za vojne potrebe, te ima bolja mehanička svojstva od E-stakla, ali nije komercijalno dostupno. S-2 staklo je komercijalna verzija S-stakla, koje ima nešto slabija svojstva. Zbog niske cijene, neloših mehaničkih i odličnih električnih svojstava, E-staklo je najkorištenije ojačavajuće vlakno u kompozitima polimerne matrice. Mane staklenih vlakana su relativno visoka težina, slabija dinamička čvrstoća i snižavanje mehaničkih svojstava u prisutnosti vlage. U tablici 3.4 prikazana su svojstva E i S-2 staklenih vlakana.

Tablica 3.4 - Svojstva E i S-2 staklenih vlakana [25]

| Svojstvo                        | E-staklo    | S-2 staklo |
|---------------------------------|-------------|------------|
| Gustoća, g/cm <sup>3</sup>      | 2.54 ÷ 2.6  | 2.46       |
| Vlačna čvrstoća, GPa            | 3.45 ÷ 3.79 | 4.89       |
| Youngov modul elastičnosti, GPa | 72.4        | 86.9       |
| Vlačno istezanje, %             | 4.8         | 5.7        |
| Toplinsko istezanje, μm/m-°C    | 5           | 1.6        |

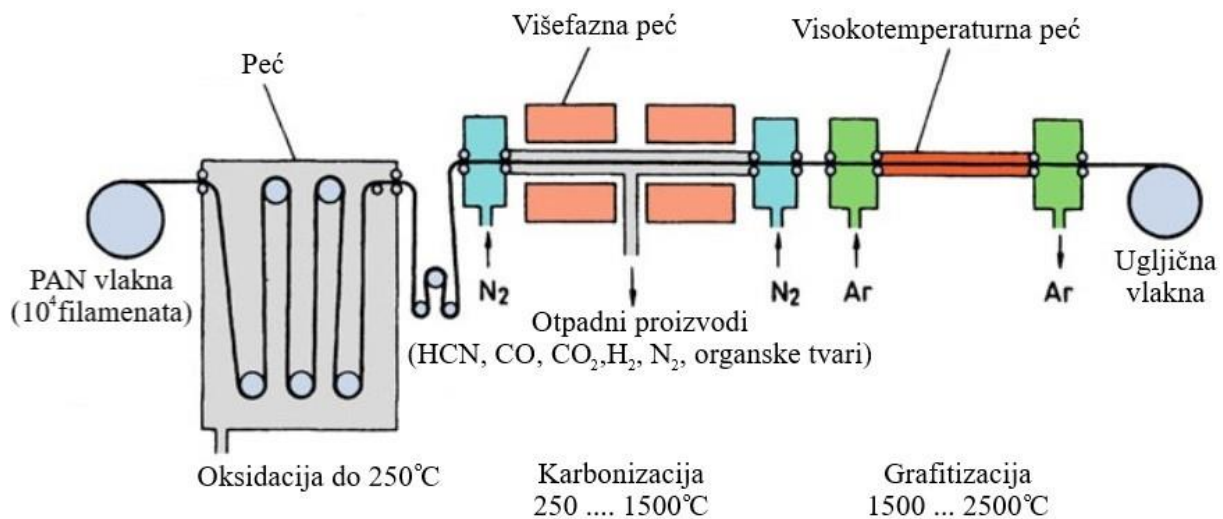
#### 3.2.2.2 Ugljična vlakna

Ugljična vlakna dostupna su u vrijednostima modula elastičnosti od 200 do 1000 GPa. Vlakna standardnog modula elastičnosti (200 ÷ 300 GPa) uobičajeno imaju manju težinu, cijenu, višu vlačnu i tlačnu čvrstoću i više produljenje do loma. Također, vlakna visokog modula elastičnosti nisu komercijalno dostupna, već se isključivo koriste u vojne svrhe.



Osim odličnih mehaničkih svojstava, ugljična vlakana imaju vrlo nizak stupanj toplinskog istezanja i odličnu toplinsku provodljivost. Mane ugljičnih vlakana su nisko produljenje do loma, niska otpornost na udarce i visoka cijena.

Najkorištenija sirovina za izradu ugljičnih vlakana je poliakrilonitril (PAN), koji se koristi za izradu 90% ukupne proizvodnje ugljičnih vlakana. Na slici 3.9 prikazan je proces dobivanja ugljičnih vlakana od poliakrilonitrila (PAN).



Slika 3.9 - Proizvodnja ugljičnih vlakana od PAN-a [16]

Udio ugljika u vlaknima prelazi 90%, a najčvršća i najkruća vlakna imaju udio koji se približava 100%. Ugljična vlakna kao ojačanje u kompozitima primjenjuju se u izradi proizvoda koji zahtijevaju maksimalna mehanička svojstva uz minimalnu masu. U tablici 3.5 prikazana su svojstva ugljičnih vlakana.

Tablica 3.5 - Svojstva raznih ugljičnih vlakana [26]

| Svojstvo                        | Standardni modul | Srednji modul | Visoki modul |
|---------------------------------|------------------|---------------|--------------|
| Gustoća, g/cm <sup>3</sup>      | 1.8              | 1.8           | 1.9          |
| Vlačna čvrstoća, GPa            | 3.45 ÷ 4.83      | 3.45 ÷ 6.2    | 3.45 ÷ 5.52  |
| Youngov modul elastičnosti, GPa | 220 ÷ 241        | 290 ÷ 297     | 345 ÷ 448    |
| Vlačno istezanje, %             | 1.5 ÷ 2.2        | 1.3 ÷ 2       | 0.7 ÷ 1.0    |
| Toplinsko istezanje, μm/m-°C    | - 0.4            | - 0.55        | - 0.75       |

### 3.2.2.3 *Innegra™ S vlakna*

Innegra™ S su sintetska vlakna napravljena od poliolefin propilena. Prednosti Innegra™ S vlakana su izrazito mala težina ( $0.84 \text{ g/cm}^3$ ), dobra otpornost na udarce, odlično prigušivanje vibracija, visoka duktilnost i mogućnost recikliranja.

Koriste se u kombinaciji s drugim vlaknima zbog odličnog svojstva istezanja prije pucanja (9.5 %). Najčešće se koriste u obliku hibridnih tkanina s ugljičnim vlaknima. Dodavanjem Innegra™ S vlakana, povećava se duktilnost i otpornost na udarce kompozita od ugljičnih vlakana.

### 3.2.2.4 *Aramidna vlakna*

Aramidna vlakna je generički naziv za sintetska aromatična poliamidna vlakna. A, česti komercijalni naziv je Kevlar proizvođača DuPont, a Twaron proizvođača Teijin Aramid.

Prednosti aramidnih vlakana su visoka specifična čvrstoća i krutost, termalna stabilnosti (u smjeru vlakana negativan koeficijent toplinskog istezanja), dobra otpornost na udarce i dobra otpornost na kemikalije. Mane aramidnih vlakana su osjetljivost na vlagu (viša nego kod ugljičnih i staklenih), loša tlačna čvrstoća, loša otpornost na UV zračenje, težina obrade (posebne škare za rezanje, posebni rezni alati) i teže natapanje vlakana.

Aramidna vlakna se primjenjuju gdje je potrebno svojstvo otpornosti na udarce uz odlična mehanička svojstva. Također imaju visoku primjenu u raznim štitnicima, kacigama i oklopima. U tablici 3.6 prikazana su svojstva pojedinih aramidnih vlakana.

Tablica 3.6 - Svojstva pojedinih aramidnih vlakna [6]

| Svojstvo  | Kevlar 49   | Kevlar 149  |
|---|-------------|-------------|
| Gustoća, $\text{g/cm}^3$                            | 1.44 ÷ 1.45 | 1.46 ÷ 1.48 |
| Vlačna čvrstoća, GPa                                | 2.5 ÷ 3     | 3.2 ÷ 3.6   |
| Youngov modul elastičnosti, GPa                     | 117 ÷ 130   | 170 ÷ 190   |
| Vlačno istezanje, %                                 | 1.8 ÷ 3     | 1 ÷ 1.3     |
| Toplinsko istezanje, $\mu\text{m/m-}^\circ\text{C}$ | - 4 ÷ - 2   | - 3 ÷ - 2   |

### 3.2.2.5 *Prirodna vlakna*

Za razliku od ostalih ojačavajućih vlakana, prirodna vlakna su biorazgradiva i potrošnja energije za njihovu proizvodnju je vrlo malena. Prirodna vlakna imaju odlično svojstvo

akustičnog prigušivanja, a pojedina imaju bolju specifičnu krutost nego staklena vlakna. Najčešća vrsta prirodnog vlakna primijenjenog kao ojačanje u kompozitima polimerne matrice je lan. U tablici 3.7 prikazana su svojstva lanenog vlakna.

Tablica 3.7 - Svojstva lana [6]

| Svojstvo                        | Lan        |
|---------------------------------|------------|
| Gustoća, g/cm <sup>3</sup>      | 1.4 ÷ 1.5  |
| Vlačna čvrstoća, MPa            | 345 ÷ 1500 |
| Youngov modul elastičnosti, GPa | 27.6 ÷ 100 |
| Vlačno istezanje, %             | 2 ÷ 3.2    |

### 3.3 Proizvodni postupci kompozita polimerne matrice

Značajni dio troškova kompozitnih materijala je trošak proizvodnje. Neki procesi zahtijevaju visoka kapitalna ulaganja s niskom radnom snagom, a neki mala kapitalna ulaganja s visokom radnom snagom.

Najčešći proizvodni postupci kompozita polimerne matricu su: ručno laminiranje, ručno laminiranje potpomognuto vakuumom, podtlačno ulijevanje smole, naštrcavanje, pultrudiranje, namatanje, razna kalupljenja, automatizirano polaganje ojačanja i postupci u autoklavu.

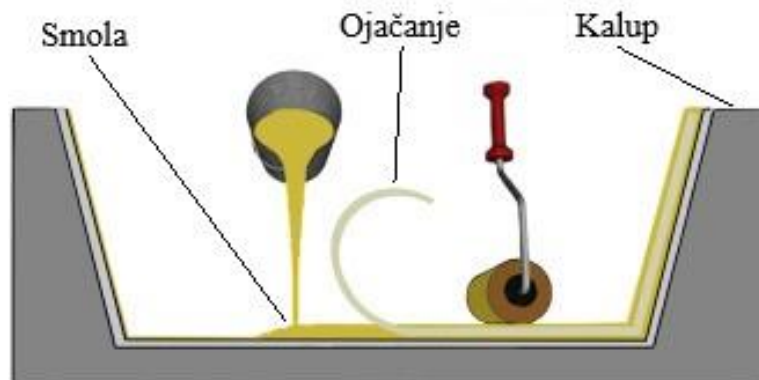
#### 3.3.1 Ručno laminiranje

Ručno laminiranje je najstariji i najjednostavniji proizvodni proces kompozita polimerne matrice. Zahtijeva minimalna kapitalna ulaganja, ali i intenzivan rad. Kvaliteta procesa ovisi o vještini radnika.

Proces započinje premazivanjem kalupa sa sredstvom za odvajanje. Kao sredstvo za odvajanje koriste se voskovi, polivinil alkohol i razni kemijski odvajajući. Nakon toga slojevi ojačanja, koji mogu biti u različitim oblicima, se laminiraju i natopljuju sa smolom. Vrlo je bitno da mjehurići zraka ne ostanu zarobljeni, jer oni smanjuju mehanička svojstva kompozita. Zarobljeni mjehurići mogu se ukloniti valjanjem s posebnim valjcima i/ili dodavanjem i pritezanjem gornjeg dijela kalupa.

Također, zarobljeni mjehurići se mogu ukloniti postavljanjem kalupa u vreću i vakumiranja. To povećava troškove izrade, ali osigurava najbolja moguća svojstva proizvoda. Također, u slučaju korištenja predimpregniranih tkanina, ručno laminiranje je početni proces, a proces

stvrđivanja se odvija u peći ili autoklavu. Na slici 3.10 prikazan je proizvodni postupak ručnog laminiranja kompozita polimerne matrice.

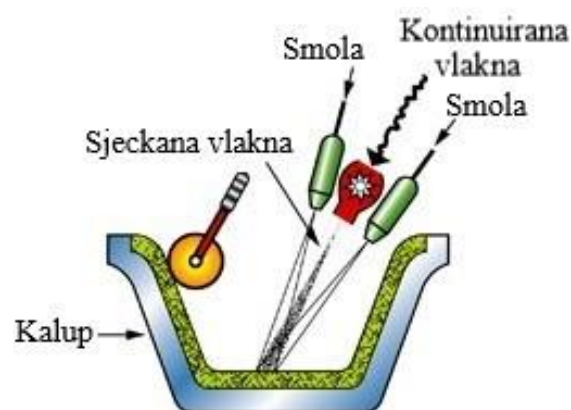


Slika 3.10 - Proizvodni proces ručnog laminiranja [27]

### 3.3.2 Naštrcavanje

Naštrcavanje je proizvodni proces koji služi za brzu i jeftinu izradu površinom velikih proizvoda. Na kalup koji je premazan odvajačem prvo se premazuje sloj tvrde poliesterske smole (gelcoat). Te se onda pomoću pištolja nanose slojevi sjeckanih staklenih vlakana pomiješanih s poliesterskom smolom. Kontinuirana staklena vlakna (*roving*) ulaze u pištolj, gdje se sjeckaju i miješaju s poliesterskom smolom. Nakon što se nanese sloj vlakana i smole, posebnim valjcima se valja površina nanesenog sloja da se istisnu mjehurići zraka.

Mehanička svojstva proizvoda izrađenih ovim procesom su lošija nego kod proizvoda koji koriste ojačanje u obliku kontinuiranih vlakna. Ovim procesom najčešće se izrađuju trupovi brodova, bazeni, kade, itd. Na slici 3.11 prikazan je proizvodni proces naštrcavanja.

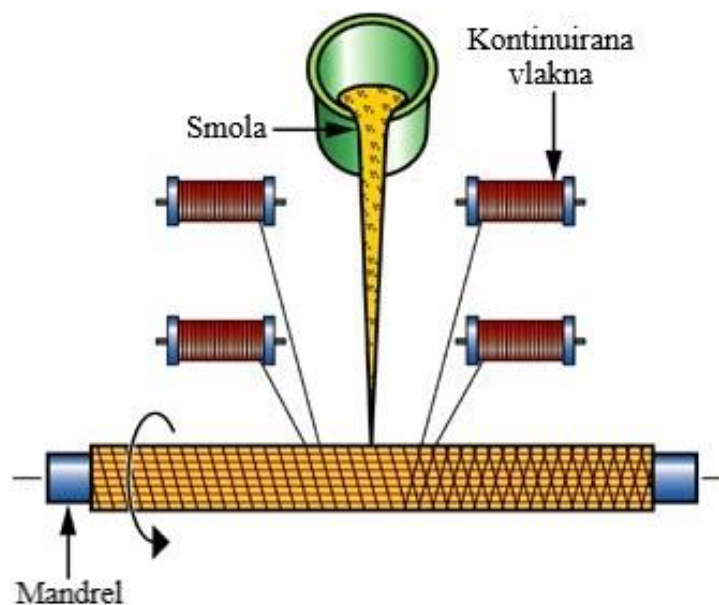


Slika 3.11 - Proizvodni proces naštrcavanja [6]

### 3.3.3 Namatanje

Proizvodni proces namatanja služi za izradu otvorenih ili zatvorenih cilindričnih proizvoda. Strojevi za namatanje se sastoje od vratila koje se vrti oko svoje osi i dijela koji se giba uz vratilo i namata kontinuirana vlakna na vratilo. Postoje razne izvedbe strojeva za namatanje.

Proizvodi izrađeni ovim procesom imaju odlična mehanička svojstva. Moguća je upotreba raznih ojačavajućih vlakana i smola. Odlična značajka ovog procesa je da se može u potpunosti automatizirati. Ovim procesom se izrađuju razni spremnici, kućišta raketa, automobilski kotači, razne cijevi, itd. Na slici 3.12 prikazan je proizvodni proces namatanja.



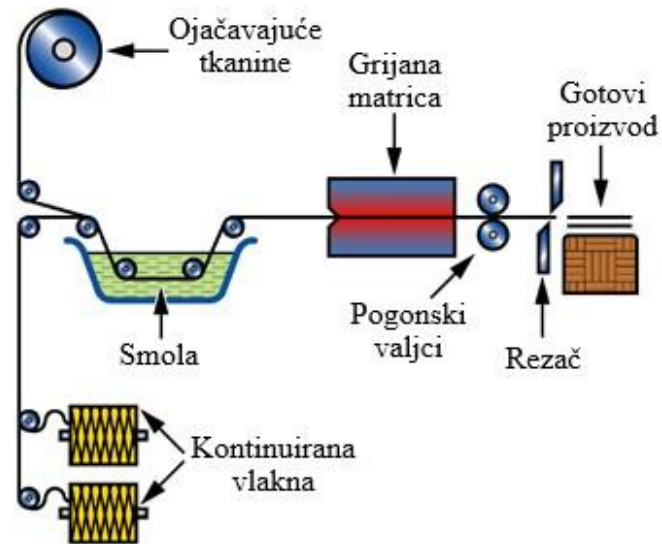
Slika 3.12 - Proizvodni proces namatanja [6]

### 3.3.4 Pultruzija

Proizvodnim procesom pultruzije proizvode se kompozitni dijelovi konstantnog poprečnog presjeka. Najčešće se proizvode pune i šuplje cijevi, nosači raznih profila i ravne ploče.

Proces započinje provlačenjem kontinuiranih vlakna i matova kroz kadu sa smolom. Nakon toga, natopljena ojačanja prolaze kroz razne matrice od kojih je zadnja grijana. Konačni korak je odrezivanje profila na željenu duljinu.

Dodavanjem ojačanja u obliku mata, povećava se poprečna čvrstoća kompozita. Ovim proizvodnim procesom moguće je postići visok maseni udio vlakana u kompozitu (do 70 %). Na slici 3.13 prikazan je proizvodni proces pultruzije.



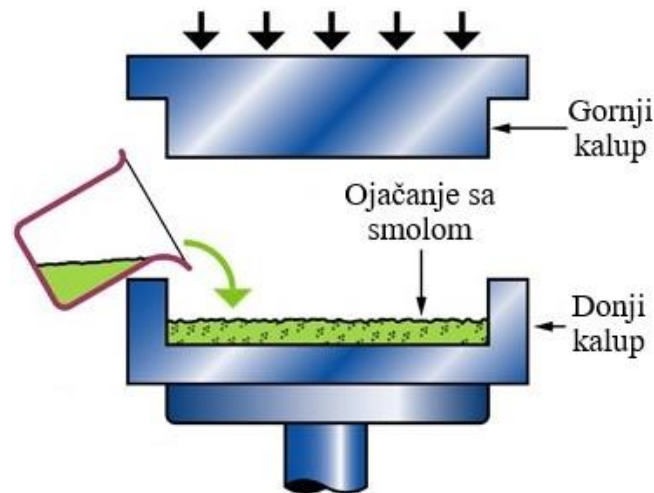
Slika 3.13 - Proizvodni proces pultruzije [6]

### 3.3.5 Kalupljenje

Postoji više različitih procesa kalupljenja, ali kod svih je zajedničko da se sastoje od gornjeg i donjeg kalupa koji spajanjem prešaju kompozit, oblikujući ga u konačni oblik. Kalupi mogu biti grijani, a najčešće se izrađeni od metala. Ojačanje i matrica mogu se postaviti u kalup u raznim oblicima od predimpregniranih tkanina, do već pomiješanih smjesa smole i sjeckanih vlakana.

Proces započinje premazivanjem oba kalupa odvajačem. Nakon toga ojačanje i matrica se postavljaju u donji kalup. Te se onda gornji kalup spaja s donjim, istiskujući višak smole između dva kalupa. I konačno, nakon stvrdnjavanja, proizvod se vadi iz kalupa te ide na daljnju obradu. Također, moguć je proces u kojem se ojačanje u obliku tkanina postavi u kalup, te nakon spajanja gornjeg kalupa, ubrizguje se smola. Kod ovog procesa kalup se u cijelosti zatvori, a ovaj proces se zove kalupljenje prijenosom smole (RTM).

Proizvodni procesi kalupljenja se koriste u serijskoj proizvodnji, zbog visoke brzine izrade i mogućnosti automatiziranja. Proizvode izrađene kalupljenjem odlikuje odlična obostrana kvaliteta površine i odlična mehanička svojstva proizvoda. Na slici 3.14 prikazan je proizvodni proces otvorenog kalupljenja.



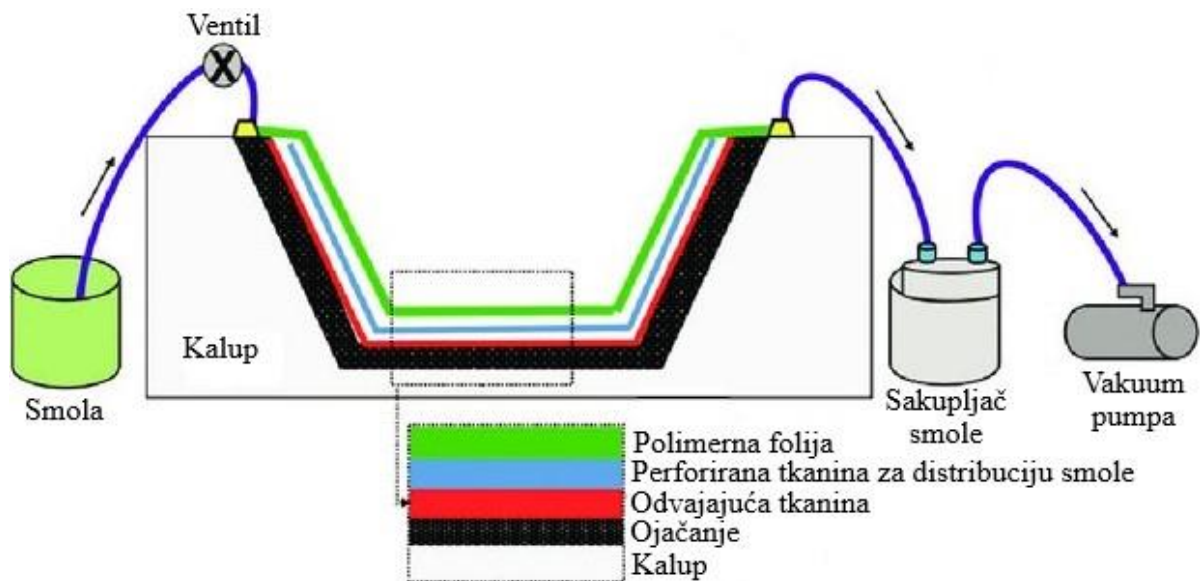
Slika 3.14 - Proizvodni proces otvorenog kalupljenja [6]

### 3.3.6 Podtlačno ulijevanje smole (VIP)

U procesu podtlačnog ulijevanja ojačavajuće tkanine se impregniraju smolom pomoću vakuuma.

Proces započinje polaganjem suhих ojačavajućih tkanina na prethodno pripremljen kalup. Nakon što se ojačavajuće tkanine postave, na njih se postavljaju dodatne tkanine/folije koje imaju različite svrhe (odvajajuća tkanina, perforirana tkanina za distribuciju smole) i cijevi koje služe za distribuciju smole. Zadnji sloj je polimerna folija koja u potpunosti zatvara kalup. Tada se uključuje vakuumska pumpa koja izvlači zrak iz kalupa, stvarajući podtlak. Nakon što je postignut željeni podtlak, pumpa se isključuje i cijev s kojom je posuda sa smolom spojena na kalup se otvara. Smola tada ulazi u kalup i impregnira slojeve tkanina.

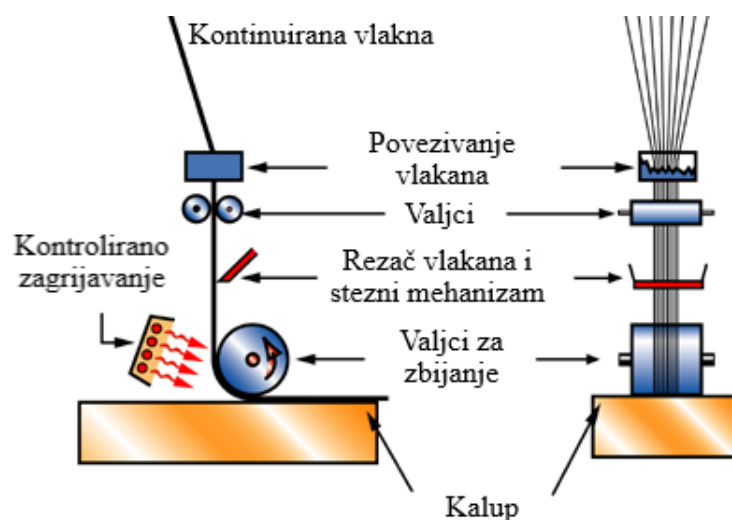
Mehanička svojstva proizvoda izrađenih ovim procesom su odlična. Pomoću procesa podtlačnog ulijevanja smole izrađuju se razni proizvodi, od lopatica vjetroturbina i trupova brodova do raznih kompliciranih dijelova. Na slici 3.15 prikazan je proizvodni proces podtlačnog ulijevanja smole.



Slika 3.15 - Proizvodni proces podtlačnog ulijevanja smole [28]

### 3.3.7 Automatizirano polaganje ojačanja (ATP)

U ovome procesu ojačanje u obliku predimpregniranih jednoosnih tkanina ili predimpregniranih kontinuiranih vlakana se polaže na kalup pomoću višeosnog CNC stroja. Ojačanja se prije samog polaganja zagrijevaju da bi se što bolje zalijepila za kalup ili prethodni sloj. Nakon laminiranja svih predviđenih slojeva, kalup odlazi u autoklav, gdje se pomoću temperature i pritiska kompozit stvrdnjava. Ovim procesom se višestruko ubrzava proces ručnog laminiranja, te se značajno smanjuju troškovi izrade proizvoda velike površine (npr. krila aviona). Na slici 3.16 prikazan je proces automatiziranog polaganja ojačanja u obliku kontinuiranih vlakana.



Slika 3.16 - Proizvodni proces automatiziranog polaganja ojačanja [6]

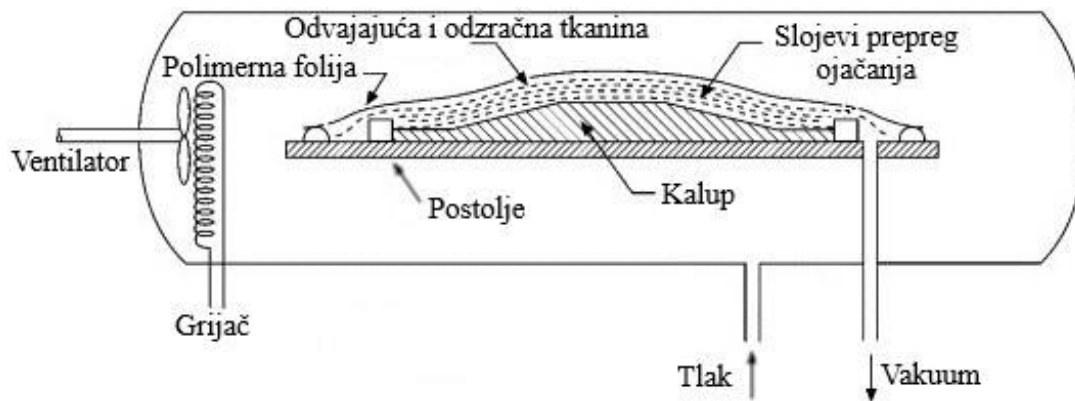


### 3.3.8 Autoklav procesi

Autoklav je peć pod pritiskom, najčešće cilindričnog oblika, koja služi za stvrdnjavanje kompozita izrađenih od predimpregniranih (prepreg) tkanina.

Na kalup premazan odvajačem slojevi predimpregniranih tkanina se laminiraju ručno ili pomoću CNC stroja (ATP). Ovisno o broju slojeva tkanina, potrebno je vakuumirati slojeve prije samog procesa stvrdnjavanja u autoklavu. Ovo se izvodi u slučaju ručnog laminiranja radi uklanjanja zarobljenog zraka između slojeva tkanina, a u nekim slučajevima se obavlja i kod laminiranja pomoću CNC stroja (ATP). Nakon toga, preko laminiranih slojeva dodaje se odvajajuća tkanina, odzračna tkanina i završna polimerna folija. Kalup se vakuumira i postavlja se unutar peći. U peći, kalup se spaja na vakuum liniju i vrata peći se zatvaraju. Temperatura u peći se mijenja određenim ciklusom, ovisno o vrsti smole u predimpregniranoj tkanini. Nakon završetka ciklusa, kalup se vadi i proizvod se odvaja.

Proces izrade kompozita u autoklavu osigurava najbolja moguća mehanička svojstva i izrazito visoku kvalitetu površine. Zbog visoke cijene autoklava razvili su se proizvodni procesi nazvani „izvan autoklava“ (*out of autoclave*, OOA) kod kojih je potrebna temperatura i vakuum za stvrdnjavanje kompozita, bez dodatnog tlačenja peći. Na slici 3.17 prikazan je autoklav proizvodni proces.



Slika 3.17 - Autoklav proizvodni procesi [29]

## 4. Metoda konačnih elemenata

Metoda konačnih elemenata je numerička metoda koja se koristi za rješavanje inženjerskih i matematičkih problema.

Formulacija problema kod metode konačnih elementa rezultira rješenjem u obliku sustava algebarskih jednadžbi. Ove numeričke metode daju približne vrijednosti nepoznanica pri diskretnom broju točaka u kontinuumu. Stoga se ovaj postupak modeliranja tijela dijeljenjem u ekvivalentni sustav manjih tijela (konačnih elemenata) povezanih u zajedničkim točkama, čvorovima i/ili linijama i/ili površinama naziva diskretizacija.

U metodi konačnih elemenata, umjesto da se rješava problem za cijelo tijelo u jednoj operaciji, formuliraju se jednadžbe za svaki pojedini konačni element, te se kombinacijom rezultata dobiva rješenje za cijelo tijelo. Rješenje strukturnih problema obično se odnosi na određivanje pomaka na svakoj točki i opterećenja na svakom konačnom elementu tijela koje se analizira [30].

### 4.1 Modeliranje, analiza i vizualizacija

Za različita inženjerska područja postoje mnogi komercijalni računalni programi s mogućnostima analize metodom konačnih elementa. Neki od programa, poput ANSYS, Abaqus i HyperSizer, imaju posebne mogućnosti za analizu kompozitnih materijala.

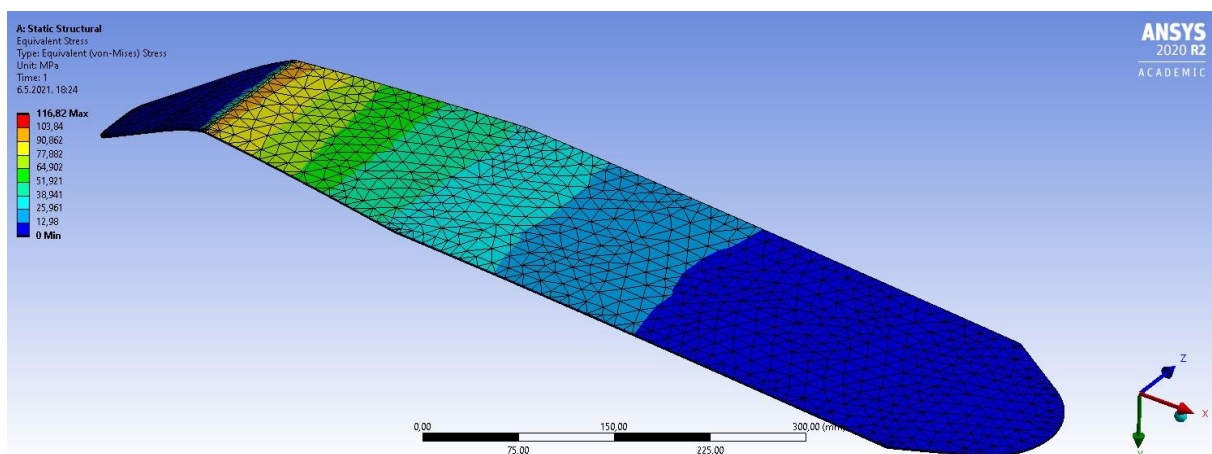
Moderni programi za analizu metodom konačnih elementa najčešće su sastavljeni od tri bloka: pretprocesora, procesora i postprocesora. U pretprocesoru, modelu se definira geometrija, svojstva materijala, te se definiraju opterećenja i granični uvjeti. Pomoću tih podataka, procesor može izračunati krutost matrice i vektore sila, te zatim se rješavaju algebarske jednadžbe i dobiva se rješenje u obliku vrijednosti pomaka. U zadnjem bloku, postprocesoru, generiraju se rezultati, poput naprezanja i deformacija, koji se često pregledavaju pomoću grafičkih alata.

Geometrija modela dobiva se specificiranjem svih čvorova, njihovih položaja i definiranjem povezanosti elemenata. Postoje dva načina za generiranje mreže elemenata. Prvi način je ručno stvaranje mreže, a drugi način je upotreba već izrađenog modela na kojem se generira mreža elemenata.

Jedan od najvažnijih aspekata uspješne analize kompozitnih materijala je unošenje ispravnih svojstava materijala. Osim svojstava materijal, različiti strukturni elementi zahtijevaju unos različitih dodatnih parametara. Tako laminati od kompozitnih materijala zahtijevaju redoslijed slaganja, debljinu i orijentaciju vlakana lamine.

U strukturalnoj analizi, opterećenja su definirana intenzitetom i lokacijom, a mogu biti u obliku sila, pritiska i momenata. Moguće je dodavanje i drugih oblika opterećenja poput gravitacije i trenja. Granični uvjeti su poznate vrijednosti stupnjeva slobode, koji ovisno o broju definiraju granični uvjet.

Nakon što se rješenje izračuna, postprocesor se može koristiti za pregled i analizu rezultata. Postprocesori komercijalnih programa daju konturne crteže raspodjele naprezanja i deformacija, a moguća je i video animacija istih. Na slici 4.1 prikazan je postprocesor u programu ANSYS, gdje su naprezanja prikazana u različitim konturama na modelu lista.



Slika 4.1 - Naprezanja u listu

## 5. Izrada kompozitnih listova

U ovome poglavlju prikazan je kompletan proces izrade kompozitnih listova peraja.

### 5.1 Oblikovanje kompozitnih listova

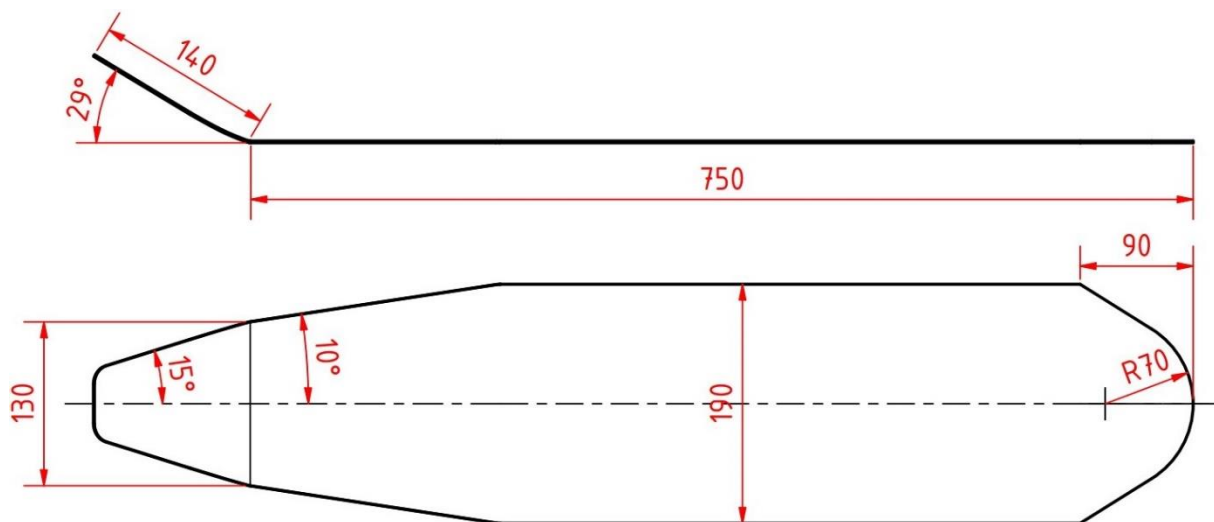
List peraje je definiran osnovnim dimenzijama, kutom pod kojim je savijen i oblikom završetka.

Preširoki list nije dobar zbog mogućnosti zapinjanja jednog lista od drugi prilikom korištenja. Također, preuski list ima malu površinu. Odabrana je optimalna širina lista koja iznosi 190 mm. Duljina lista ovisi o primjeni i korisniku. Odabrana je duljina lista koja iznosi 750 mm od kuta savijanja.

Savijanje lista služi da list bude u liniji s tijelom, što rezultira smanjenjem opterećenja na zglobove stopala korisnika. Odabran je kut savijanja koji iznosi  $29^\circ$ .

Postoji mnogo raznih oblika završetka lista koji se primjenjuju. Trenutno nisu dostupni rezultati ispitivanja performansi raznih oblika završetaka lista. Odabran je zaobljeni vrh lista.

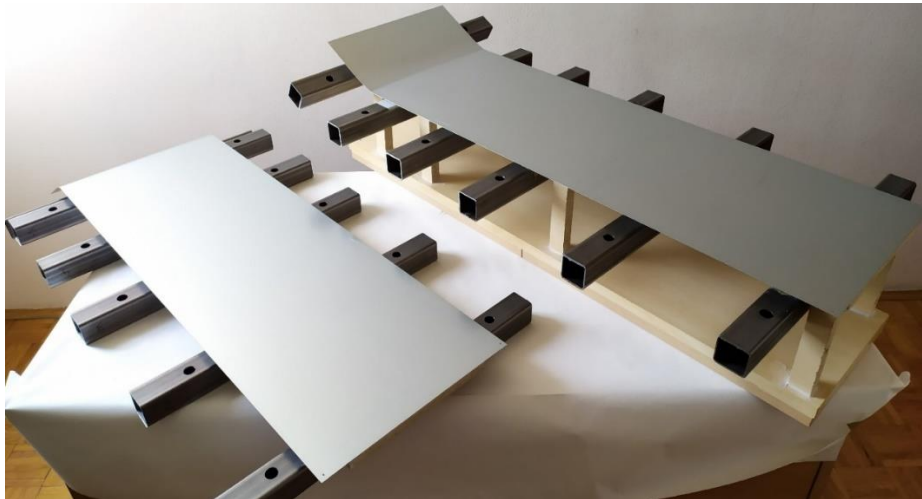
Oblik dijela lista koji se spaja sa stopom oblikuje se za pojedinu vrstu stope. U ovome slučaju oblik je oblikovan za stopu *Forza* proizvođača *Leaderfins*. Na slici 5.1 prikazan je odabrani oblik lista peraje.



Slika 5.1 - Odabrani oblik lista peraje

## 5.2 Izrada kalupa

Prema odabranom obliku lista, proizvodnom procesu i predviđenom broju izradaka, kalup se izrađuje. Kalup je oblikovan tako da se svaki list pojedinačno izrađuje. Kalup se sastoji od donjeg i gornjeg dijela koji se mogu rastaviti. Na slici 5.2 prikazan je rastavljeni kalup.



*Slika 5.2 - Rastavljeni kalup*

Dodirne plohe su napravljene od pocinčanog čeličnog lima debljine 0.5 mm. Ovaj lim je odabran zbog vrlo glatke površine i lake mogućnosti oblikovanja. Iverica je prilijepljena na lim radi ukrućenja.

Čelični profili 40x40x2 mm, kojih je po šest na svakom dijelu, služe za stezanje kalupa. Kroz provrte na profilima, vijcima se priteže kalup. Na slici 5.3 prikazan je sastavljeni kalup.



*Slika 5.3 - Sastavljeni kalup*

### 5.3 Plan laminiranja

U ovome potpoglavlju prikazan je proces određivanja količine, veličine i vrste ojačavajućih slojeva u kompozitu. Željeni profil savijanja lista postiže se određenim rasporedom slojeva ojačavajuće tkanine.

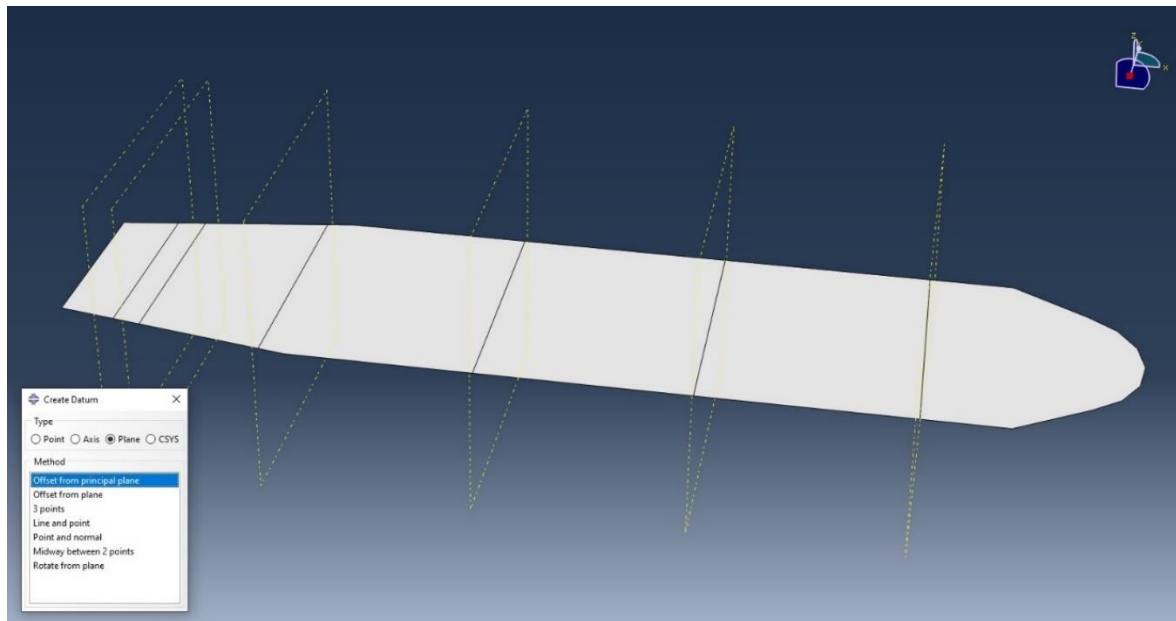
Osim veličine i količine ojačavajućih slojeva tkanine, vrlo bitan faktor je vrsta tkanine. Najbolja mehanička svojstva tkanine imaju u pravcu osi vlakana. A budući da se list može smatrati konzolnim nosačem opterećenim na savijanje, najbolji izbor je jednoosno usmjerena tkanina postavljena uduž lista.

Upotrebom samo jednoosno usmjerene tkanine može doći do loma lista, jer poprečna čvrstoća takvih tkanina je vrlo mala (5 ÷ 10 % uzdužne). Također može doći do neželjenog torzijskog uvijanja lista. Ovi problemi se rješavaju dodavanjem tkanine kojoj vlakna idu pod kutom od 0° i 90°. Tako dobivamo balansirani kompozit koji ima vrlo visoka mehanička svojstva u jednom smjeru (duž lista), a dovoljna u poprečnom. Još jedan važan faktor je težina tkanine, koja se većinom odabire iskustveno.

#### 5.3.1 Analiza konačnih elementa u programu Abaqus

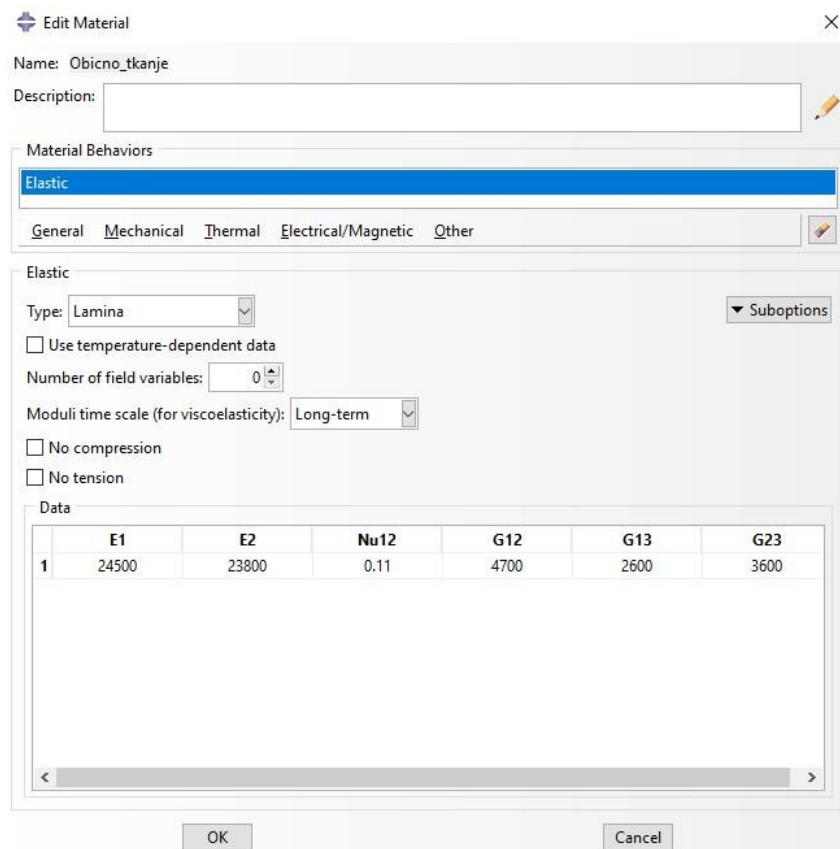
Primjenom metode konačnih elemenata dobivaju se saznanja o napreznjima u listu i profilu savijanja. Program koji se koristi za analizu konačnih elemenata je *Abaqus CAE 2020*. U nastavku su detaljno prikazani koraci analize lista ojačanog staklenim vlaknima, a isti je proces i za list ojačan ugljičnim i Innegra™ S vlaknima.

Analiza započinje u modulu *Part*, crtanjem skice i izradom modela lista. Nakon što je model lista generiran, model se dijeli na sekcije. To se radi zbog toga da se mogu dodijeliti različita svojstva materijala za svaku pojedinu sekciju. Veličina sekcija se može naknadno mijenjati kako bih se dobili željeni rezultati. Na slici 5.4 prikazan je model lista podijeljen na sekcije pomoću alata *Datum* i *Partition*.



Slika 5.4 - Model lista podijeljen na sekcije

Nadalje, u modulu *Property* potrebno je unijeti svojstva materijala, u ovome slučaju svojstva lamina. Na slici 5.5 prikazano je unošenje svojstava materijala za tkaninu običnog tkanja od staklenih vlakana.



Slika 5.5 - Unošenje mehaničkih svojstva tkanine običnog tkanja od staklenih vlakana

Nakon toga izrađuju se laminati od prethodno definiranih lamina. Dodaje se vrsta, količina i debljina lamine, te orijentacija vlakana u lamini. Na slici 5.6 je prikazani su detalji jednog od izrađenih laminata.

**Edit Section** [Close]

Name: Section-1  
Type: Shell / Continuum Shell, Composite

Section integration:  During analysis  Before analysis

Layup name:

Basic **Advanced**

Thickness integration rule:  Simpson  Gauss

Symmetric layers

| Material      | Thickness | Orientation Angle | Integration Points | Ply Name |
|---------------|-----------|-------------------|--------------------|----------|
| Obicno_tkanje | 0.32      | 0                 | 3                  |          |
| Jednoosno     | 0.42      | 0                 | 3                  |          |
| Jednoosno     | 0.42      | 0                 | 3                  |          |
| Jednoosno     | 0.42      | 0                 | 3                  |          |
| Jednoosno     | 0.42      | 0                 | 3                  |          |
| Jednoosno     | 0.42      | 0                 | 3                  |          |
| Jednoosno     | 0.42      | 0                 | 3                  |          |
| Obicno_tkanje | 0.32      | 90                | 3                  |          |

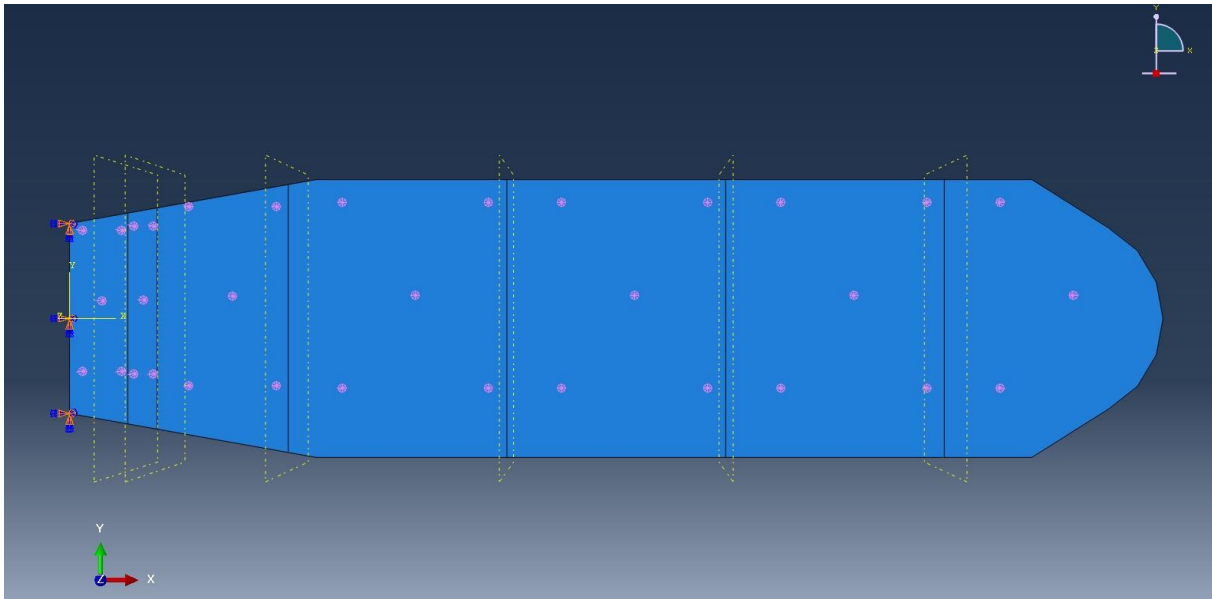
Options:

OK Cancel

Slika 5.6 - Izrada laminata

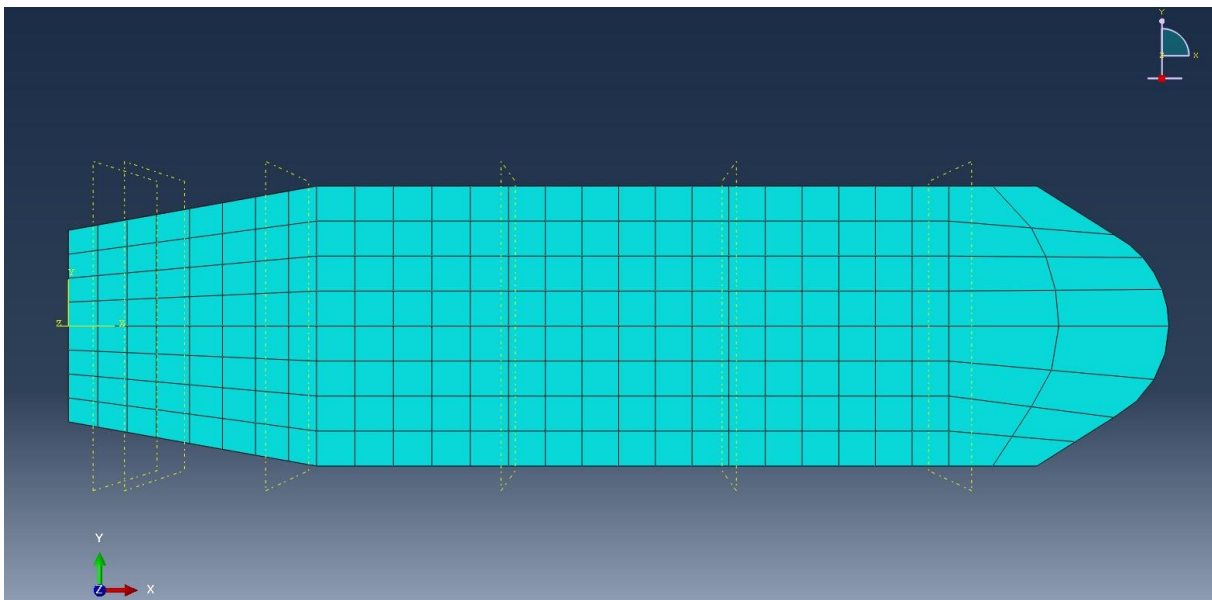
Nakon što su svi laminati definirani, dodjeluju se predviđenim sekcijama. Idući korak u analizi je postavljanje graničnih uvjeta. Dodaje se granični uvjet s 0 stupnjeva slobode na rubu gdje se monitaju stope. Također, dodaje se opterećenje u obliku pritiska na cijelu površinu modela. Na 5.7 vidi se postavljeni granični uvjet na lijevom kraju i opterećenje u obliku pritiska na cijeloj površini modela.





Slika 5.7 - Granični uvjeti i opterećenje na modelu

Nadalje, generira se mreža ljuskastih elementa, što je mreža gušća, rezultati su precizniji. Valja napomenuti da studentska verzija *Abaqusa* ne dozvoljava više od 1000 čvorova po modelu, što u ovom slučaju rezultira vrlo rijetkom mrežom. Na slici 5.8 prikazan je model s generiranom mrežom ljuskastih elemenata.

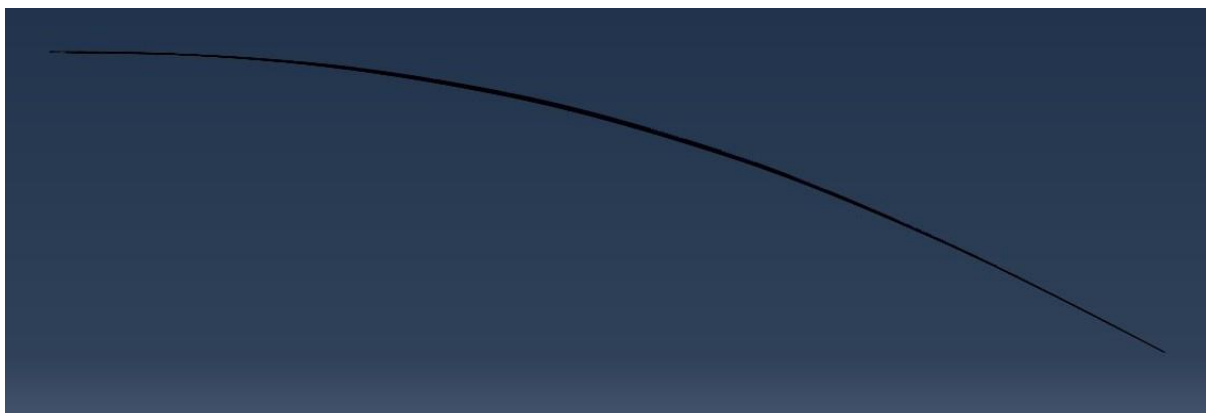


Slika 5.8 - Model s generiranom mrežom ljuskastih elemenata

I konačni korak je pokretanje rješavanja analize.

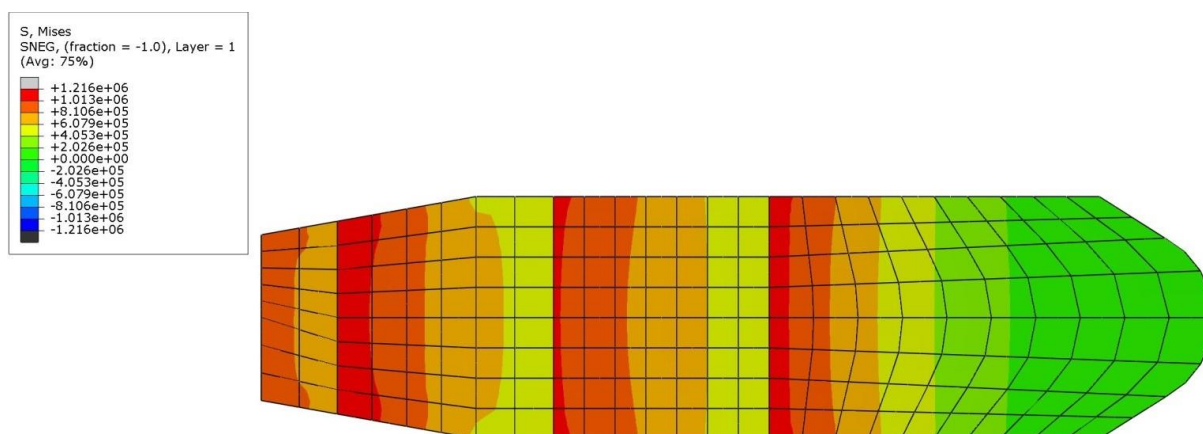
### 5.3.1.1 Rezultati analize

Na slici 5.9 prikazana je deformacija lista od kompozita ojačanog staklenim vlaknima.



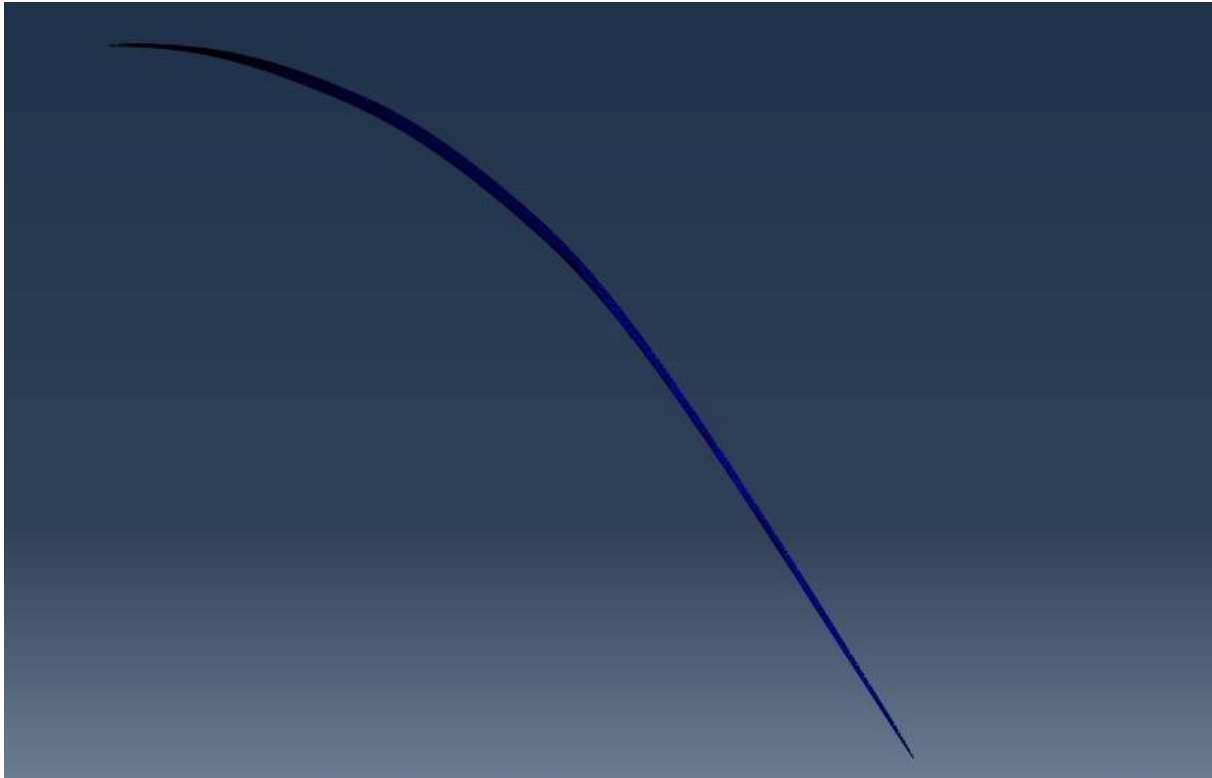
Slika 5.9 - Deformacija lista izrađenog od staklenih vlakana

Na slici 5.10 prikazana su naprežanja u listu od kompozita ojačanog staklenim vlaknima. Može se uočiti da je naprežanje najveće na početku lista, što je i očekivano. Isto tako mogu se uočiti porasti naprežanja na mjestima gdje jedan sloj ojačanja završava. To je zbog toga jer je na tim mjestima povećan udio smole.



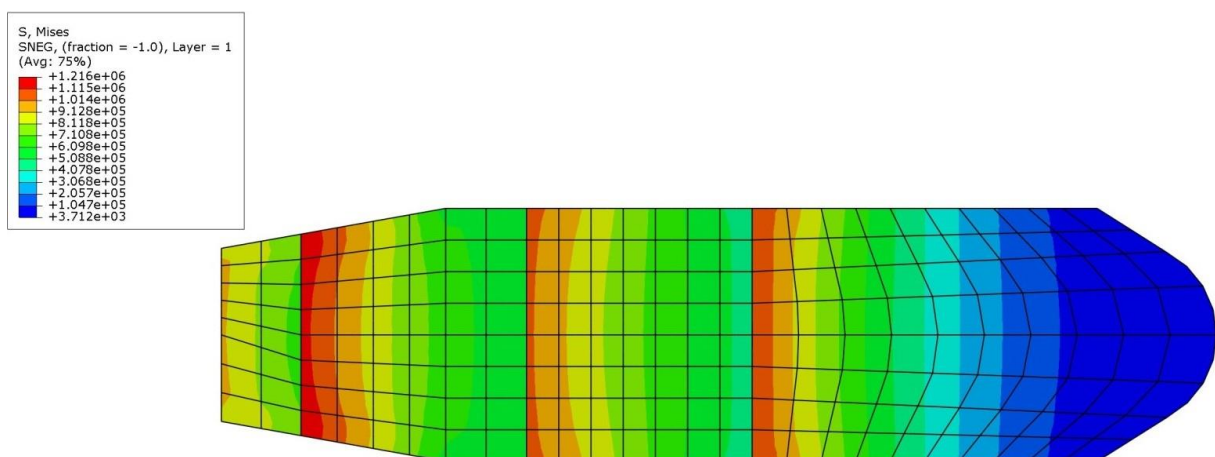
Slika 5.10 - Naprežanja u listu od staklenih vlakana

Na slici 5.11 prikazana je deformacija lista od kompozita ojačanog ugljičnim i Innegra™ S vlaknima.



Slika 5.11 - Deformacija lista od ugljičnih i Innegra™ S vlakana

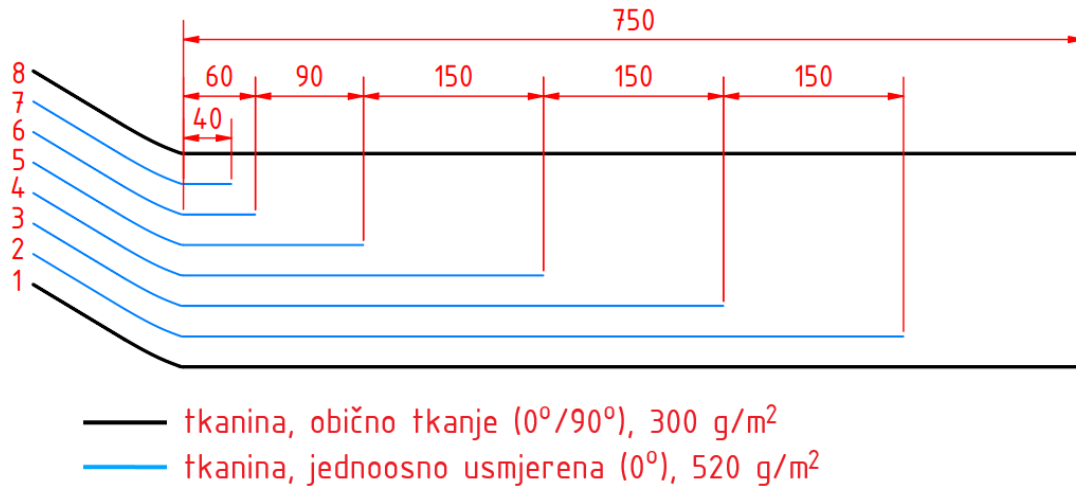
Na slici 5.12 prikazana su naprezanja u listu od kompozita ojačanog ugljičnim i Innegra™ S vlaknima.



Slika 5.12 - Naprezanja u listu od ugljičnih i Innegra™ S vlakana

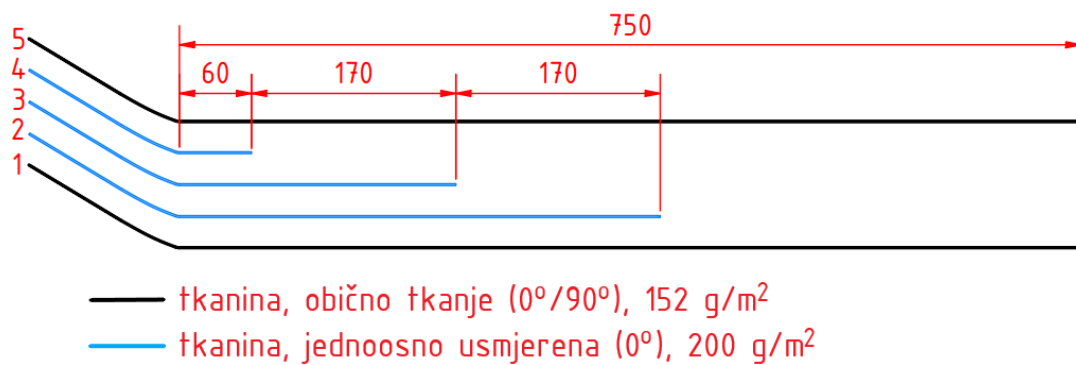
### 5.3.2 Plan laminiranja za staklena vlakna

Prema rezultatima izvršene analize konačnih elementa određuje se plan laminiranja. Na slici 5.13 prikazan je plan laminiranja za verziju lista ojačanog staklenim vlaknima.



Slika 5.13 - Plan laminiranja, staklena vlakna

Na slici 5.14 prikazan je plan laminiranja za verziju lista ojačanog ugljičnim i Innegra™ S vlaknima.



Slika 5.14 - Plan laminiranja, ugljična i Innegra™ S vlakna

## 5.4 Materijali za izradu

U ovome potpoglavlju prikazane su pojedinosti materijala koji će se koristiti za izradu kompozitnih listova.

### 5.4.1 Epoksidna smola

Kao matrica kompozita koristi se West System 105/206 koji se sastoji od epoksidne smole 105 i utvrđivača 206 (Sl. 5.15). Ova kombinacija epoksidne smole i utvrđivača ima dobra mehanička svojstva i usporeno stvrdnjavanje (mogućnost rada 20 ÷ 30 minuta nakon miješanja). U tablici 5.1 prikazane su karakteristike odabrane epoksidne smole i utvrđivača.



Slika 5.15 - Epoksidna smola i utvrđivač [31]

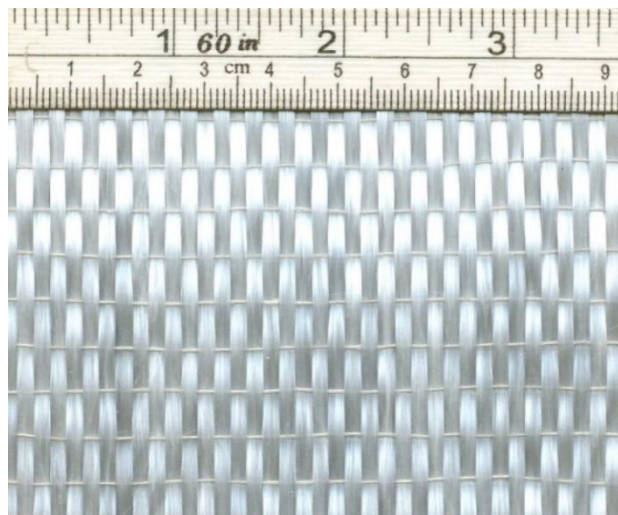
Tablica 5.1 - Karakteristike West System 105/206 epoksidne smole i utvrđivača [32]

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| Gustoća smole, g/cm <sup>3</sup>      | 1.16  |
| Gustoća utvrđivača, g/cm <sup>3</sup> | 1.01  |
| Tvrdoća (Shore D)                     | 83    |
| Vlačna čvrstoća, MPa                  | 50.46 |
| Vlačno istezanje, %                   | 4.5   |
| Savojna čvrstoća, MPa                 | 81.42 |

### 5.4.2 Staklena vlakna

Za izradu listova sa staklenim vlaknima koristi se tkanina s jednoosno usmjerenim vlaknima i tkanina običnog tkanja.

Na slici 5.16 prikazan je uzorak tkanine s jednoosno usmjerenim vlaknima. Tkanina se sastoji od vlakana E-stakla, težine 1200 g/1000 m i vlakana od termoplasta koja ih povezuju. Težina tkanine iznosi 520 g/m<sup>2</sup>.



Slika 5.16 - Jednoosno usmjerena tkanina od staklenih vlakana [33]

Na slici 5.17 prikazan je uzorak tkanine s običnim tkanjem. Težina tkanine iznosi  $300 \text{ g/m}^2$ , a vlakna su od E-stakla nepoznate težine.



Slika 5.17 - Obično tkana tkanina od staklenih vlakana [34]

#### 5.4.3 Ugljična/Innega<sup>TM</sup> S vlakna

Za izradu listova s ugljičnim i Innega<sup>TM</sup> S vlaknima koristi se tkanina s jednoosno usmjerenim vlaknima i tkanina običnog tkanja.

Na slici 5.18 prikazan je uzorak tkanine s jednoosno usmjerenim vlaknima. Tkanina se sastoji od ugljičnih vlakana Toray Torayca® T700SC i vrlo tankih staklenih vlakana koja ih povezuju. Ugljična vlakna su teška  $800 \text{ g/1000 m}$ , te imaju 12000 filamenata. U tablici 5.2 prikazana su mehanička svojstva ugljičnih vlakana. Težina tkanine iznosi  $200 \text{ g/m}^2$ .



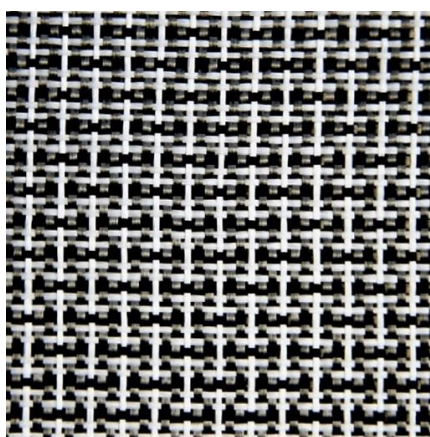


Slika 5.18 - Jednoosno usmjerena tkanina od ugljičnih vlakana [35]

Tablica 5.2 - Mehanička svojstva ugljičnih vlakana Toray Torayca® T700SC [35]

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| Vlačna čvrstoća, MPa            | 4900 |
| Youngov modul elastičnosti, GPa | 230  |
| Vlačno istezanje, %             | 2.1  |
| Gustoća, g/cm <sup>3</sup>      | 1.8  |

Na slici 5.19 prikazan je uzorak tkanine od kombinacije ugljičnih i Innegra™ S vlakana. Ugljična vlakna su teška 200 g/1000 m, te imaju 3000 filamenata. Vlakna Innegra™ S 940 su teška 104 g/1000 m, te imaju 75 filamenata. U tablici 5.3 prikazana su mehanička svojstva Innegra™ S 940 vlakana. Težina tkanine iznosi 152 g/m<sup>2</sup>, omjer ugljičnih i Innegra™ S 940 vlakana u tkanini je 1:1.



Slika 5.19 - Hibridna tkanina od ugljičnih/ Innegra™ S vlakana [36]

Tablica 5.3 - Mehanička svojstva Innegra™ S 940 vlakana [37]

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| Vlačna čvrstoća, MPa            | 667   |
| Youngov modul elastičnosti, GPa | 14.83 |
| Vlačno istezanje, %             | 9.5   |
| Gustoća, g/cm <sup>3</sup>      | 0.84  |

## 5.5 Izrada listova procesom ručnog laminiranja

Prvi postupak u izradi listova je nanošenje odvajачa na bazi karnuba voska po površini kalupa. Na slici 5.20 prikazan je korišteni vosak. Zbog toga što je kalup nov, nanoseno je 10 slojeva voska, a nakon toga po 2 sloja za svako novo laminiranje. Glavni razlog korištenja odvajачa na bazi karnuba voska je visoka kvaliteta površine gotovog proizvoda. Nedostatak upotrebe voska je visoko potrebno vrijeme za nanošenje.

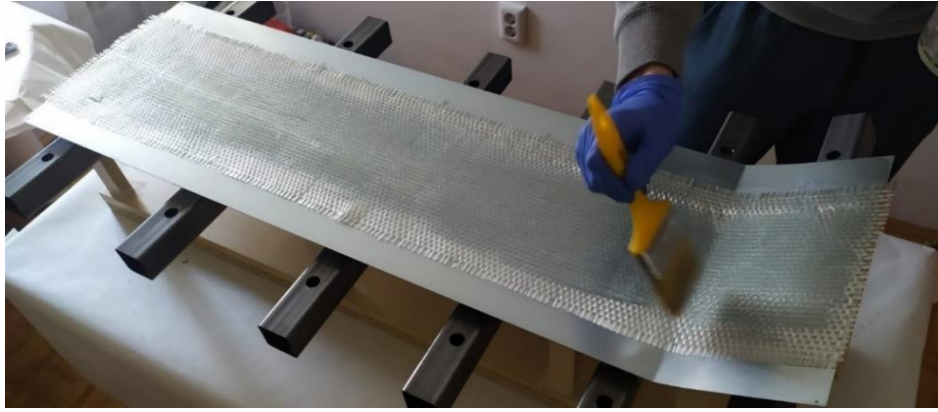


Slika 5.20 - Karnuba vosak za odvajanje kalupa [38]

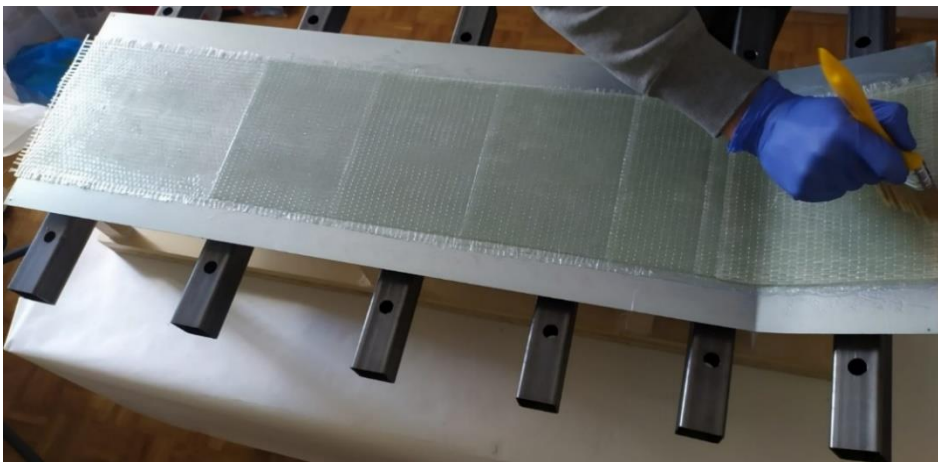
Nakon što je odvajач nanesen na kalup potrebno je odrezati tkanine na potrebne dimenzije. Tkanine su odrezane na veće dimenzije nego zamišljene dimenzije listova radi lakše završne obrade. Valja napomenuti da se tkanine od staklenih i ugljičnih vlakana vrlo lako režu običnim škarama, dok one s Innegra™ S vlaknima teže.

Idući korak je sam proces ručnog laminiranja koji započinje miješanjem epoksidne smole s utvrđivačem. Smola se s utvrđivačem miješa u omjeru 5:1. Izrazito je bitno pogoditi točan omjer i dobro ih promiješati. Nakon što je smola pomiješana, pomoću kista se nanosi na postavljanje tkanine. Tkanine se moraju natopiti smolom, jer u slučaju da neki dio tkanine ostane suh može doći do pucanja kompozita. Nakon što se jedna tkanina natopi na nju se postavlja druga i proces se ponavlja sve do zadnjeg sloja tkanine. Na slici 5.21 i na slici 5.22 prikazan je proces ručnog laminiranja tkanina od staklenih vlakana. Staklena vlakna kada se natope smolom postanu prozirna, što je velika prednost u radu





*Slika 5.21 - Ručno laminiranje tkanina od staklenih vlakana, prvi sloj*



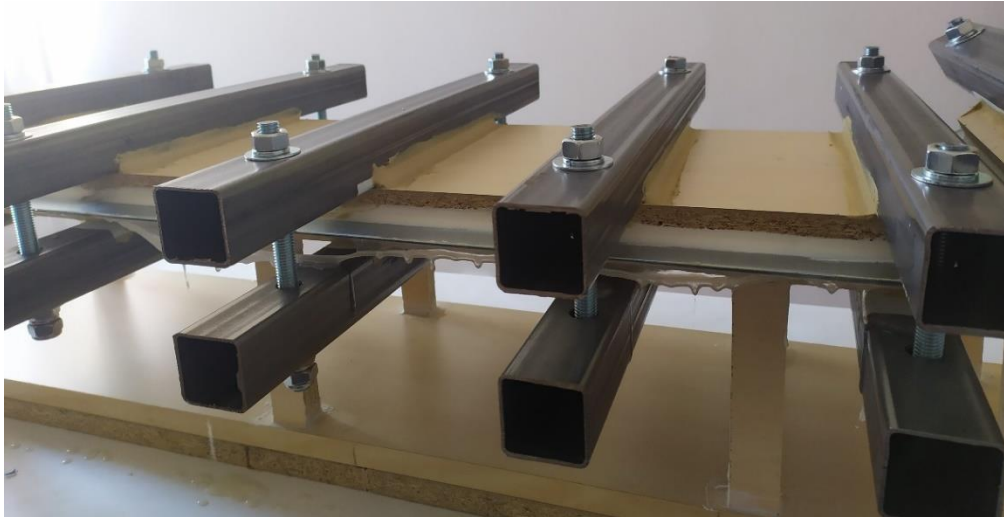
*Slika 5.22 - Ručno laminiranje tkanina od staklenih vlakana, predzadnji sloj*

Na slici 5.23 prikazan je proces ručnog laminiranja tkanina od ugljičnih i Innegra™ S vlakana. Za razliku od staklenih, kod hibridne tkanine od ugljičnih i Innegra™ S vlakana teže je uočiti natopljenost.



*Slika 5.23 - Ručno laminiranje tkanina od ugljičnih i Innegra™ S vlakana*

Nakon što su svi slojevi tkanine laminirani, gornji dio kalupa se postavlja. Vijci se pritežu moment ključem kako bi osigurala jednaka sila pritezanja. Dodavanjem gornjeg dijela kalupa povećava se udio vlakana u kompozitu i osigurava se obostrana kvaliteta površine gotovog proizvoda. Na slici 5.24 može se uočiti istisnuti višak smole nakon stezanja kalupa.



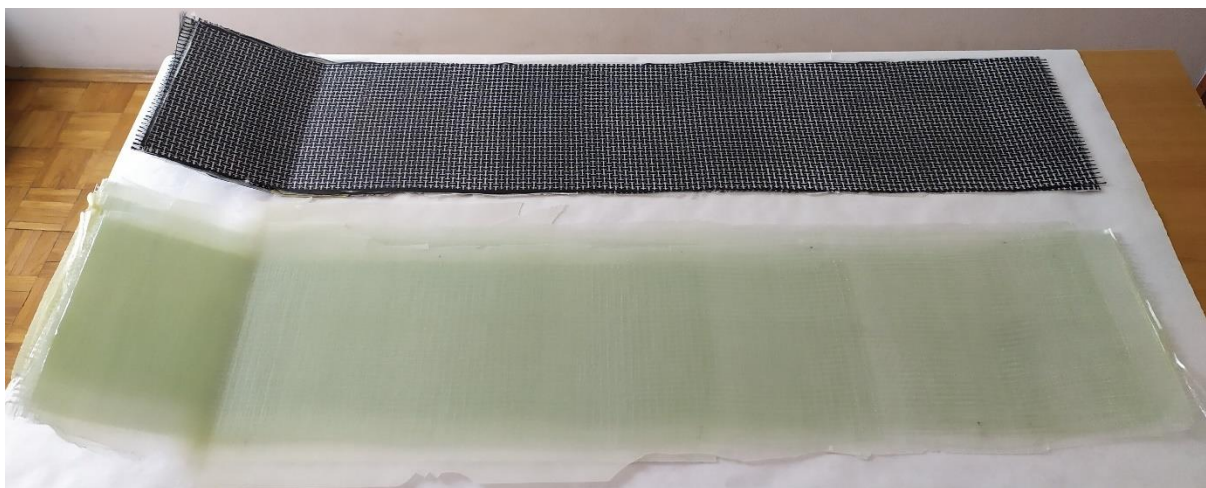
*Slika 5.24 - Curenje viška smole iz kalupa*

Ručnim laminiranjem može se postići maseni udio vlakana od 50 % u kompozitu. Dodavanjem i pritezanjem gornjeg dijela kalupa taj udio raste do nekih 55 %. Povećanjem masenog udjela vlakana mehanička svojstva kompozita rastu, kod najboljih proizvodnih procesa može se postići 75 %. Nakon što je kompozit ostavljen da se stvrdne 24 sata, izrađeni list se odvaja i vadi iz kalupa.

## **5.6 Završna obrada listova**

Na slici 5.25 prikazani su listovi izvađeni iz kalupa. Listove je potrebno obraditi na prethodno definirane dimezije.

Listovi se obrađuju proizvodnim procesom ručnog rezanja. Kao alat koristi se list pile za rezanje metala zbog dobre kvalitete reza. Idealna obrada listova bi bila na CNC glodalici. Na slici 5.26 prikazani su obrađeni listovi peraja.



*Slika 5.25 - Izrađeni listovi*

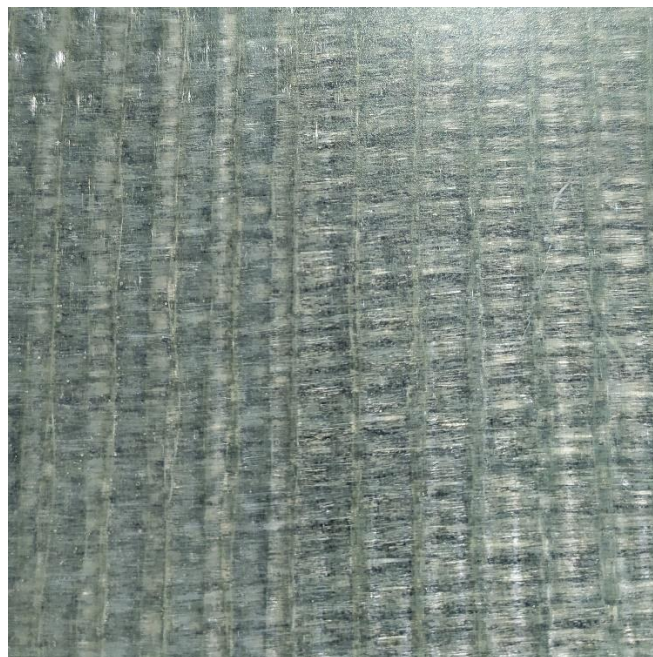


*Slika 5.26 - Obradjeni listovi peraja*



## 6. Rezultati

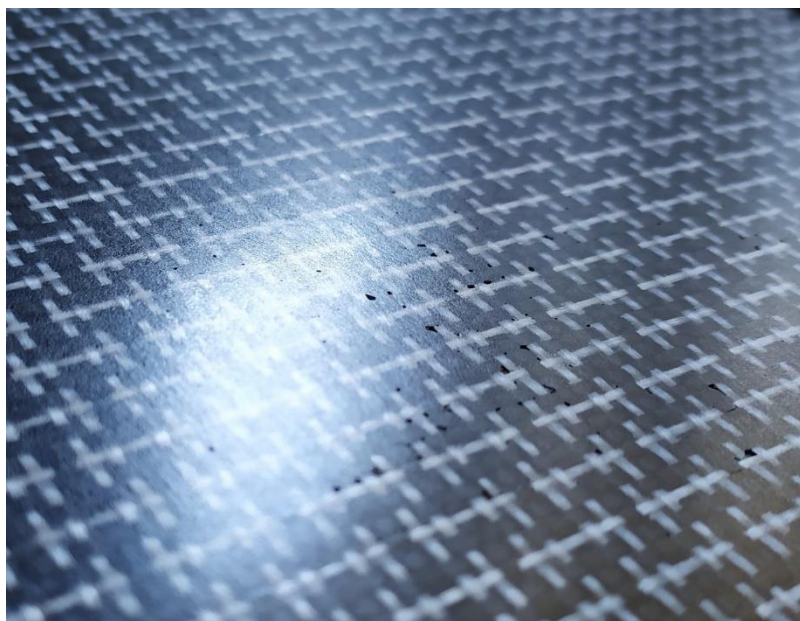
Dobiveni listovi izrađeni od kompozita ojačanog staklenim vlaknima imaju vrlo malo površinskih nedostataka, dijelova gdje vlakna nisu natopljena i zarobljenih mjehurića zraka. Tkanine od staklenih vlakana pokazale su se vrlo jednostavnim i lakim za rad. Na slici 6.1 prikazana je površina lista peraje izrađenog od kompozita ojačanog staklenim vlaknima.



*Slika 6.1 - Površina lista peraje od kompozita ojačanog staklenih vlaknima*

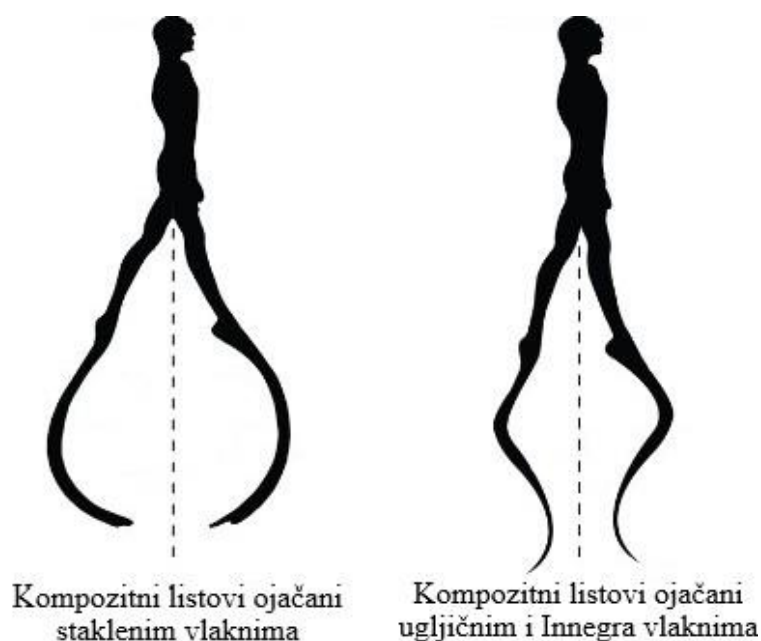
Dobiveni listovi izrađeni od kompozita ojačanog ugljičnim i Innegra™ S vlaknima imaju pojedine dijelove gdje su mjehurići zraka ostali zarobljeni na površini (Sl. 6.2). Na tim dijelovima mehanička svojstva kompozita su snižena. U slučaju da je list napravljen isključivo s ugljičnim vlaknima, velika je vjerojatnost da bi na tim dijelovima došlo do loma lista. Ali, zbog upotrebe Innegra™ S vlakana, mala je vjerojatnost.

Razlog nastajanja zarobljenih mjehurića zraka je nenatopljenost vlakana ili upotreba nedovoljne količine epoksidne smole. Oba problema bi se riješila laminiranjem s većom količinom epoksidne smole i valjanjem slojeva tkanina posebnim valjkom za istiskivanje mjehurića zraka. Upotrebom veće količine smole porasla bi količina škarta, jer bi višak smole iscurio iz kalupa.



Slika 6.2 - Površinske greške na listu

Objekte vrste izrađenih listova su testirane u moru, plivanjem po površini i zaronima do 15 metara dubine. Izrađeni listovi su vrlo različiti, te zahtijevaju različite tehnike korištenja. Na slici 6.3 prikazani su stvarni profili savijanja listova prilikom korištenja u moru.



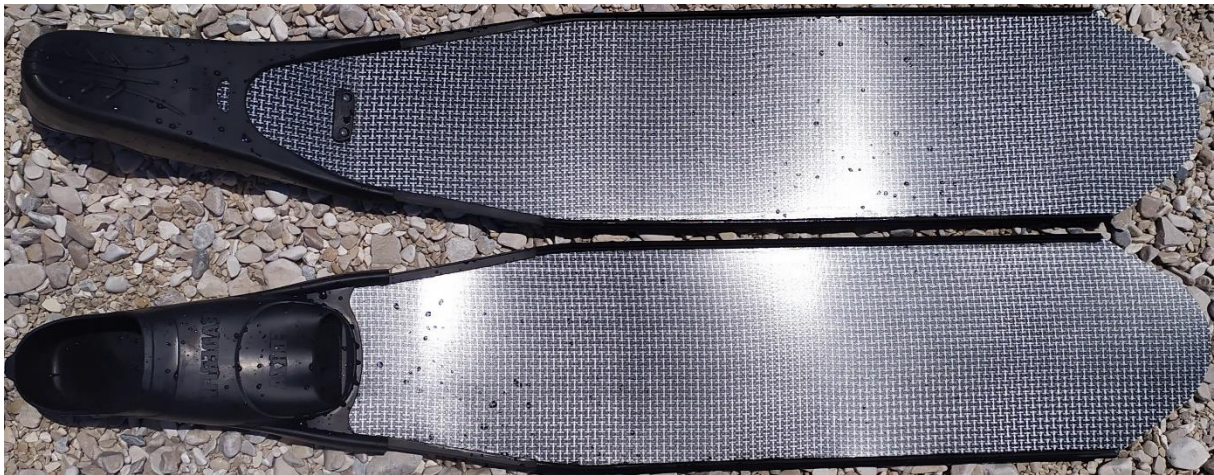
Slika 6.3 - Profili savijanja izrađenih listova prilikom korištenja u moru [39]

Na slikama 6.4 i 6.5 prikazane su stereo peraje s izrađenim listovima od ugljičnih i Innegra™ S vlakana.



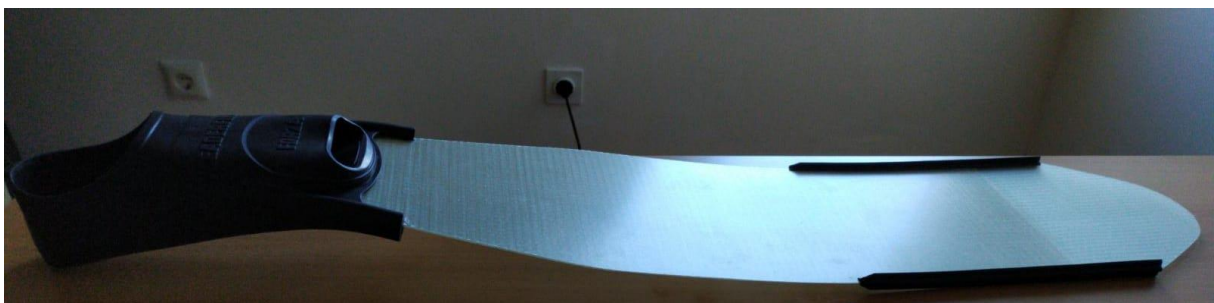


*Slika 6.4 - Stereo peraje s kompozitnim listovima ojačanim ugljičnim i Innegra™ S vlaknima*



*Slika 6.5 - Stereo peraje s kompozitnim listovima ojačanim ugljičnim i Innegra™ S vlaknima, testiranje*

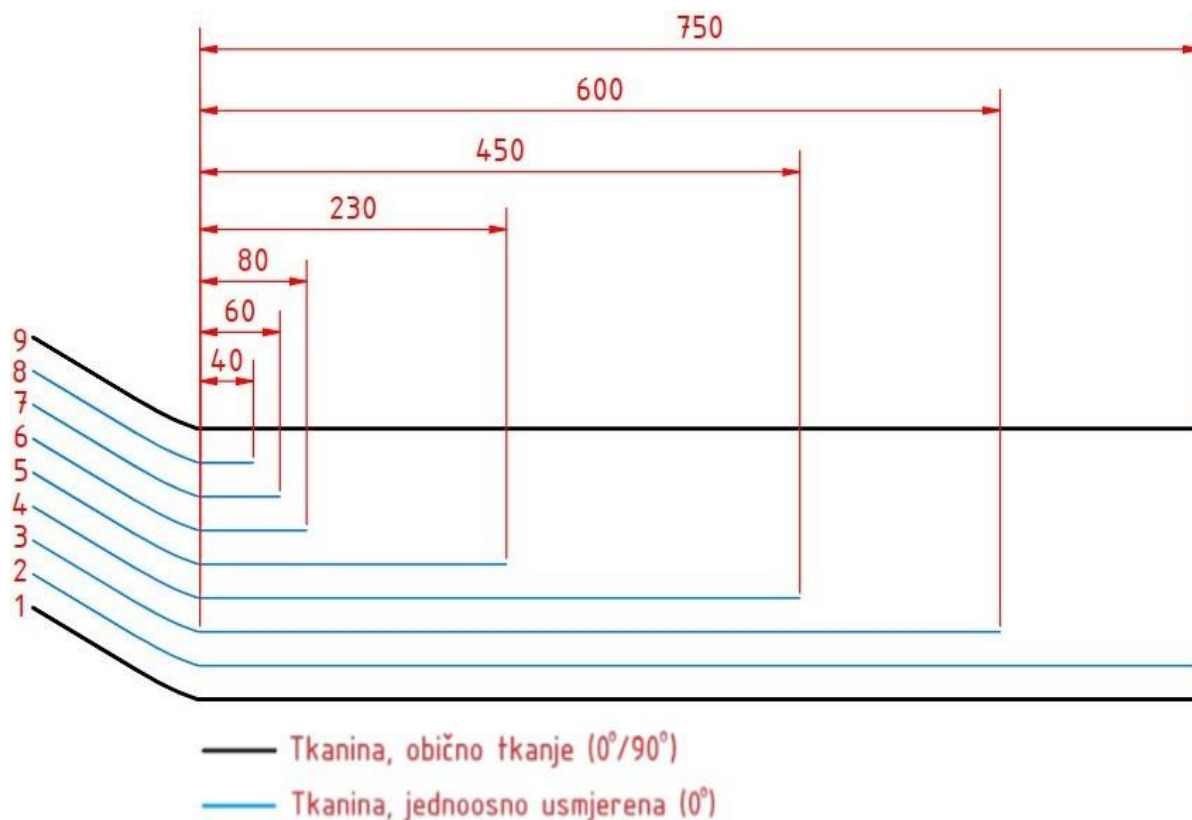
Na slici 6.6 prikazana je peraja s izrađenim listom od staklenih vlakana.



*Slika 6.6 - Peraja od staklenih vlakana*

Računalnom analizom konačnih elemenata svakako se mogu dobiti početna saznanja o deformacijama i naprezanjima u kompozitnom listu. Ali, analize nisu još na razini onih za homogene materijale, te je potrebno ispitivanje u realnim uvjetima.

Nakon testiranja obje vrste listova dobivena su nova saznanja o ponašanju različitih vrsta vlakana u kompozitnom listu peraja. Na slici 6.7 prikazan je poboljšani plan laminiranja, a u tablici 6.1 prikladne težine tkanina, ovisno o težini korisnika.



Slika 6.7 - Poboljšani plan laminiranja

Tablica 6.1 - Težine ojačavajućih tkanina, ovisno o težini korisnika

|                              | Težina korisnika, Kg | Težina tkanine običnog tkanja, g/m <sup>2</sup> | Težina jednoosne tkanine, g/m <sup>2</sup> |
|------------------------------|----------------------|---|--|
| Ugljična/Innegra<br>S vlakna | < 60                 | 150 ÷ 200                                       | 150 ÷ 200                                  |
|                              | < 70                 | 200 ÷ 250                                       | 200 ÷ 250                                  |
|                              | < 80                 | 250 ÷ 300                                       | 250 ÷ 300                                  |
|                              | < 100                | 250 ÷ 300                                       | 300 ÷ 350                                  |
|                              | > 100                | 300 ÷ 400                                       | 350 ÷ 400                                  |
| Staklena vlakna              | < 60                 | 200 ÷ 300                                       | 300 ÷ 350                                  |
|                              | < 70                 | 250 ÷ 300                                       | 300 ÷ 400                                  |
|                              | < 80                 | 300 ÷ 400                                       | 400 ÷ 450                                  |
|                              | < 100                | 400 ÷ 500                                       | 450 ÷ 500                                  |
|                              | > 100                | 400 ÷ 500                                       | 500 ÷ 550                                  |

## 7. Zaključak

U ovome radu praktično i teorijski je prikazan proizvodni proces ručnog laminiranja. Također, prikazan je proces oblikovanja i analiza konačnih elementa kompozita polimerne matrice.

Nakon testiranja obje verzije listova i dobivenih novih saznanja o ponašanju različitih težina tkanina i vrsti ojačavajućih vlakana u kompozitnom listu, prikazan je poboljšani plan laminiranja.

Izradom listova od kompozita ojačanog ugljičnim/ Innegra™ S vlaknima naspram listova ojačanih staklenim vlaknima:

- Cijena lista je veća za 80 % ,
- Težina lista je manja za 3 do 21 %, ovisno o korištenoj vrsti i masenom udjelu vlakana [6],
- Elastična potencijalna energija lista je veća za 44 do 68 %, ovisno o korištenoj vrsti i masenom udjelu vlakana [6].

Precizna usporedba učinkovitosti listova bi zahtijevala uređaj za ispitivanje učinkovitosti peraja, kao što je prikazan na slici 1.13. Zbog kompliciranosti ispitivanja, ovim radom to nije predviđeno.

Izrada kompozitnih listova peraja proizvodnim procesom ručnog laminiranja je moguća, ali zasigurno će se bolji rezultati postići proizvodnim procesima kalupljenja i procesima u autoklavu.



## Literatura

1. Zamparo P., Pendergast D., Termin B., Minetti A.: *How fins affect the economy and efficiency of human swimming*, The Journal of experimental biology, 205, 2665-76, listopad 2002.
2. Zamparo P., Pendergast D., Termin A., Minetti A.: *Economy and efficiency of swimming at the surface with fins of different size and stiffness*, European Journal of Applied Physiology, 96, 459-70, ožujak 2006.
3. <https://freediving.cetmacomposites.it/en/home/22-monofin-taras.html>, preuzeto 02. 03. 2021.
4. <https://c4carbon.com/en/product/sideral-ht/>, preuzeto 02. 03. 2021.
5. <https://spearfishing.com.au/collections/fins/products/spearfishing-blades-carbon-pure>, preuzeto 14. 06. 2021.
6. Granta CES EduPack.
7. <https://www.freedivingshop.ch/en/products/bifins-ptyryx-competition-mit-footpocket-pathos>, preuzeto 14. 06. 2021.
8. <https://deeptodive.com/product/foot-pocket-cetma-composites-s-wing/>, preuzeto 14. 06. 2021.
9. [http://www.spearfishing.de/product\\_info.php?language=en&info=p451\\_Fu-teile-Mares-Razor--Paar-.html](http://www.spearfishing.de/product_info.php?language=en&info=p451_Fu-teile-Mares-Razor--Paar-.html), preuzeto 14. 06. 2021.
10. <https://c4carbon.com/en/download/>, preuzeto 05. 07. 2021.
11. Nicolas G., Bideau B., Bideau N., Colobert B., Guerroue G., Delamarche P.: *A new system for analyzing swim fin propulsion based on human kinematic data*, Journal of Biomechanics, 43, 10, 1884-1889, srpanj 2010.
12. Deutsch G.: *Automotive applications for advanced composite materials*, 23 rd national SAMPE symposium and exhibition, Selective application of materials for products and energy, 36, 1978.

13. <https://www.brembo.com/en/car/original-equipment/products/carbon-ceramic-discs>, preuzeto 14. 05. 2021.
14. <https://www.compositesworld.com/articles/metal-matrix-composites-used-to-lighten-military-brake-drums>, preuzeto 15. 05. 2021.
15. Roeseler W.G., Sarh B., Kismarton M.U.: *Composite structures: the first 100 years*. 16th International Conference on Composite Materials. ICCM 16, 8, srpanj 2007.
16. Chawla K.K.: *Composite Materials: Science and Engineering*, Springer, 83, 2019.
17. Mallick P.K.: *Fiber-Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design, Third Edition*, CRC Press, 94-96, rujan 2007.
18. <http://docshare02.docshare.tips/files/26393/263939157.pdf>, preuzeto 07. 06. 2021.
19. <https://www.teijin.com/products/carbon-fiber/>, preuzeto 19. 05. 2021.
20. <https://www.fibermaxcomposites.com/shop/weavingstylesandpatterns.php>, preuzeto 19. 05. 2021.
21. <https://www.hacotech.com/en/composite-materials/fibreglass-mat-fibreglass-combi-mat>, preuzeto 19. 05. 2021.
22. <http://www.carbonmakers.co.uk/prestashop/spread-tow-carbon-fibre/32-carbon-fibre-spread-tow-15mm-22-twill-1m-wide.html>, preuzeto 19. 05. 2021.
23. <https://www.fibermaxcomposites.com/shop/carbon-fabrics-c-36.html>, preuzeto 14. 06. 2021.
24. <https://partconsulting.com/manufacturing-part-consulting/>, preuzeto 19. 05. 2021.
25. <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=d9c18047c49147a2a7c0b0bb1743e812>, preuzeto 21. 05. 2021.
26. Miracle D.B., Donaldson S.L.: *ASM Handbook, Volume 21: Composites*, ASM International, 98, 2001.
27. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hand-lay-up>, preuzeto 04. 03. 2021.

28. Lucena J., Lucena K.: *Wind energy in Brazil an overview and perspectives under the triple bottom line*, Clean energy, ožujak 2019.
29. Halley P.J.: *Rheology of thermosets: the use of chemorheology to characterise and model thermoset flow behaviour*, Thermosets, Structure, Properties and Applications, 2012.
30. Logan D. L.: *A First Course in the Finite Element Method*, Cengage Learning, 1-2, 2011.
31. <https://www.bauhaus.hr/epoksidna-smola-i-poliesterska-smola/west-system-set-epoxy-smole/p/10926940>, preuzeto 09. 05. 2021.
32. <https://wessexresins.co.uk/west-system/resins-and-hardeners/206-slow-hardener/>, preuzeto 09. 05. 2021.
33. <https://www.fibermacomposites.com/shop/fiberglass-fabric-br-g520u-p-100326.html?cPath=24>, preuzeto 09. 05. 2021.
34. <https://www.tradewheel.com/p/glass-fiber-woven-roving-300gsm-400gsm-567044/>, preuzeto 09. 05. 2021.
35. <https://www.fibermacomposites.com/shop/carbon-fiber-tape-rollbr-width-20-cmbr-tc200u20-p-100384.html?cPath=60>, preuzeto 09. 05. 2021.
36. <https://www.castrocompositesshop.com/en/fibre-reinforcements/2306-152-gm2-carbon-innegra%E2%84%A2s-fibre-120-cm-wide.html>, preuzeto 09. 05. 2021.
37. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=41a3b5b9a459457f8aa909d4c3e26f1c&ckck=1>, preuzeto 09. 05. 2021.
38. <https://www.fibermacomposites.com/shop/release-wax-w102-br-regular-p-221.html?cPath=66>, preuzeto 10. 05. 2021.
39. [https://xtdiving.com/index.php?route=information/information&information\\_id=21](https://xtdiving.com/index.php?route=information/information&information_id=21), preuzeto 16. 06. 2021.

# Prilozi

## 1. Prilog 1 – Nacrt kalupa

