

# Ispitivanje žilavosti kompozitnih materijala

---

**Aluga, Ranko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2010**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:826400>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-19**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

RANKO ALUGA

Zagreb, 2010

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

## **Ispitivanje žilavosti kompozitnih materijala**

Voditelj rada  
Doc.dr.sc. Krešimir Grilec  
ALUGA

RANKO

Zagreb, 2010

## Sadržaj

Sadržaj .....	1
Sažetak .....	4
Tekst završnog rada .....	5
Izjava .....	6
Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina.....	7
Popis slika .....	8
Popis tablica .....	9
Popis Kratica .....	10
1. Uvod.....	11
2. Teorija kompozitnih materijala.....	12
3. Polimerni kompoziti (PMC).....	13
4. Matrice .....	16
4.1. Mehanička svojstva matrica .....	16
4.2. Adhezijska svojstva matrice .....	17
4.3. Svojstva žilavosti matrice .....	17
4.4. Eksploatacijska svojstva matrice .....	18
4.5. Vrste materijala matrice kompozita .....	18
4.6. Epoksidne smole .....	19
4.7. Geliranje i skrućivanje .....	19
4.8. Usporedba svojstava materijala matrice.....	20
4.9. Adhezijska svojstva .....	20
4.10. Mehanička svojstva.....	20
4.11. Otpornost stvaranju mikro-pukotina .....	21
4.12. Otpornost na umor materijala.....	22
4.13. Otpornost na prodiranje medija.....	23

---

4.14.	Sažetak i pregled svojstava materijala matrica .....	24
5.	Vlakna .....	25
5.1.	Staklena vlakna .....	25
5.1.1.	Proizvodnja staklenih vlakana .....	25
5.1.2.	Vrste staklenih vlakana .....	26
5.1.3.	E–staklena vlakna .....	26
5.1.4.	Specijalna staklena vlakna .....	27
5.2.	Ugljična vlakna .....	29
5.2.1.	Proizvodnja ugljičnih vlakana .....	29
5.2.2.	Poliakrilonitrilna ugljična vlakna (PAN vlakna) .....	30
5.2.3.	Ugljična vlakna na osnovi katrana .....	31
5.2.4.	Ugljična vlakna na osnovi celuloze .....	31
5.2.5.	Svojstva ugljičnih vlakana .....	31
5.3.	Aramidna vlakna .....	32
5.3.1.	Svojstva aramidnih vlakana .....	32
5.4.	Keramička vlakna .....	33
5.4.1.	Svojstva oksidnih vlakana .....	33
5.4.2.	Svojstva neoksidnih vlakana .....	34
5.5.	Usporedba svojstava materijala vlakana .....	34
6.	Ojačala u obliku tkanina .....	36
6.1.	Jednosmjerna i dvosmjerna pletiva .....	36
7.	Strukturni kompoziti .....	39
7.1.	Sendvič konstrukcije .....	39
8.	Laminati .....	40
9.	Eksperimentalni dio .....	41
9.1.	Način ispitivanja .....	41
9.2.	Specifikacije .....	44

9.3. Dimenzije epruvete.....	44
9.4. Postupak pripreme kompozitnih materijala.....	45
9.4.1. Rezanje tkanine na mjeru .....	45
9.4.2. Priprema površine za laminiranje kompozitnog laminata.....	46
9.4.3. Miješanje materijala matrice .....	47
9.4.4. Impregniranje slojeva kompozitnog laminata .....	48
9.4.5. Opterećivanje.....	49
9.4.6. Sušenje.....	50
9.5. Ispitivanje uzoraka.....	51
Zaključak .....	53
Literatura .....	54

## Sažetak

Kompozitni materijali zbog svojih dobrih mehaničkih i fizikalnih svojstava imaju vrlo raširenu primjenu. Kako konačna svojstva ovise o velikom broju utjecaja, u radu je ispitivana različita vrsta kombinacija kompozitnih materijala. Obrađena je teorija kompozitnih laminata uz detaljan prikaz vrste materijala matrica i ojačala te njihovih svojstava. Naglasak je stavljen na polimerne kompozitne materijale. U tu svrhu je pripremljen kompozit na osnovi epoksidne smole ojačan staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima. Nadalje su opisani proizvodni postupci za izradu laminata i različitih izradaka od kompozitnih materijala te vrste spajanja istih. U sklopu rada, izrađeni su i uzorci koji su podvrgnuti eksperimentalnom laboratorijskom ispitivanju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Izvršeno je ispitivanje žilavosti kompozitnih materija na Charpyevom batu.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **RANKO ALUGA**

Mat. br.: 0035161824

Naslov: **ISPITIVANJE ŽILAVOSTI KOMPOZITNIH MATERIJALA**

Opis zadatka:

Kompozitni materijali su materijali dobiveni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Osnova kompozitnog materijala može biti metalna, keramička ili polimerna, a ojačala mogu biti u obliku čestica, vlakana ili tzv. sendvič konstrukcije. U ovom radu je potrebno:

- 1) Opisati vrste kompozitnih materijala
- 2) Navesti svojstva i primjenu polimernih kompozita
- 3) Navesti i opisati vrste, svojstva i primjenu kompozita ojačanih vlaknima
- 4) Proizvesti uzorke polimernih kompozita ojačanih različitim vrstama vlakana
- 5) Ispitati žilavost proizvedenih uzoraka
- 6) Analizirati rezultate i dati zaključak

Zadatak zadan:

11. prosinca 2009.

Rok predaje rada:

Prosinac 2010.

Zadatak zadao:

*L. Grilec*

Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Krešimir Grilec

Prof. dr. sc. Dubravko Majetić



## Izjava

Izjavljujem da sam ja – student **Ranko Aluga** – rođen 23. 01. 1987. u Zagrebu, JMBG 2301987370014, matični broj 0035161824, upisan u VII semestar akademske godine 2009/10. – radio ovaj rad samostalno sa znanjem stečenim tijekom obrazovanja, uz nadzor mentora doc.sc. Krešimira Grileca. Stručnu pomoć pri izradi rada pružio mi je laborant Božidar Bušetinčan kojemu se ovim putem zahvaljujem. Zahvalio bih se mome ocu Stevi Alugi koji je pomogao u izradi uzoraka koji su ispitivani te studentskim udrugama HSA-SF i HUSZ za ustupljeni materijal,

Također bih se zahvalio mojoj obitelji i prijateljima za veliku podršku tijekom studiranja i pripremanja završnog rada.

---

Ranko Aluga

## Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

$T_g$  – temperatura staklišta

$J$  – Joul

$mm$  - milimetara

$R_m$  – vlačna čvrstoća

$E$  - modul elastičnosti

## Popis slika

- Slika 1 Svojstva materijala matrice, vlakna i kompozita u cjelini
- Slika 2 Svojstva materijala
- Slika 3 Svojstva materijala vlakana i matrice
- Slika 4 Usporedba vlačne čvrstoće
- Slika 5 Usporedba vlačnog modula
- Slika 6 Vlačno opterećenje kompozitnog laminata
- Slika 7 Usporedba svojstava materijala matrica
- Slika 8 Svojstva kompozitnih laminata nakon uranjanja u vodu pri 100°C
- Slika 9. Staklena vlakna
- Slika 10. Ugljična vlakna
- Slika 11. Proizvodnja PAN vlakana i vlakana na bazi katrana
- Slika 12. Aramidna vlakna
- Slika 13. Platno vez
- Slika 14. Panama vez
- Slika 15. Saten tkanje
- Slika 16. Jednosmjerna tkanja
- Slika 17. Sukljani vez
- Slika 18. Prikaz sendvič konstrukcije
- Slika 19. Charpy-ev bat
- Slika 20. Charpy-ev bat
- Slika 21. Epruveta za ispitivanje
- Slika 22 Uzorak tkanine korištene u izradi uzoraka
- Slika 23 Staklena površina za laminiranje uzoraka
- Slika 24 NOVAPOX komponente epoksidne smole
- Slika 25 Vaga
- Slika 26 Umješavanje komponente epoksidne smole
- Slika 27 Početak impregnirana prvoga sloja ugljičnih vlakana
- Slika 28 Impregnirani slojevi
- Slika 29 Opterećeni slojevi
- Slika 30 Masa utega za opterećenje
- Slika 31 Usporedbe mjerenja uzoraka

## Popis tablica

Tabela 1 Pregled svojstava materijala matrice

Tablica 2. Fizikalna i mehanička svojstva staklenih vlakana

Tablica 3. Maksimalne vrijednosti nekih mehaničkih svojstava

Tablica 4. Svojstva nekih aramidnih vlakana

Tablica 5. Svojstva nekih keramičkih vlakana

Tabela 6 Usporedba svojstava materijala ojačala

Tablica 7 ISO norma za uzorak debljine 1 mm

## Popis Kratica

*PMC* – Polimer Composite – Polimerni kompozit

*FRP* – Fibre Reinforced Composite – Vlaknima ojačan kompozit

*MMC* – Metal Matrix Composite – Metalni kompozit

*CMC* – Ceramic Matrix Composite – Keramički kompozit

A – Aramidna vlakna

S – Staklena vlakna

U – Ugljična vlakna

PAN - poliakrilonitril,

## 1. Uvod

Za potpuno shvaćanje uloge i primjene kompozitnih materijala kao strukturnih elemenata konstrukcije, potrebno je razumijevanje njih samih u smislu njihove proizvodnje. Kompozitni materijali u velikoj mjeri koriste se kao sekundarni materijali u izradi konstrukcija. Povećana krutost i manja masa, rezultat su sve veće primjene kompozitnih materijala u izradi strukturnih elemenata konstrukcija zamjenjujući materijale kao što je primjerice aluminij. Ovo je postalo moguće uslijed opsežnih istraživanja složenog ponašanja kompozitnih materijala izloženih opterećenju.

U izradi konstrukcija od kompozitnih materijala karakteristični problemi koji se javljaju, a s time i loša mehanička svojstva, su spajanja strukturnih elemenata. Na mjestima spajanja strukturnih elemenata u kompozitnim konstrukcijama uslijed visokog poprečnog opterećenja ili udaraca dolazi do pojave delaminacije. U tom slučaju, međusobni odnos matrice i vlakana slojeva kompozita ima veliku ulogu u prevenciji delaminacije kako matrica nosi velik dio opterećenja.

Konvencionalni spojevi metalnih strukturnih elemenata kao što su grede, konzole, rebra i slično s ostalim dijelovima konstrukcije, obično su izvedeni uporabom zakovica ili vijaka. Metali su izotropni materijali podložni značajnijoj plastičnoj deformaciji nego kompozitni materijali, dok mehanička svojstva kompozitnih materijala daleko ovise o orijentaciji vlakana i rasporedu slojeva. Stoga su kompozitni materijali osjetljivi, a time i problematični za spajanja konvencionalnim metodama. Ono čemu se danas teži je „idealna kompozitna konstrukcija“ tj., monolitna kompozitna konstrukcija bez spojeva.

## 2. Teorija kompozitnih materijala

U svojoj osnovnoj formi, kompozitni materijal je onaj, sastavljen od najmanje dva različita materijala čija su svojstva bitno različita od onih koje posjeduju sami za sebe. U praksi, većina kompozita sastoji se od osnovnog materijala ili matrice te ojačala u obliku vlakana ili čestica čiji je zadatak povećanje čvrstoće i krutosti matrice koja ih objedinjuje. Danas, uobičajeni sintetski kompoziti mogu se podijeliti u tri osnovne grupe:

**Polimerni kompoziti (PMC)** – najčešće se koriste te su detaljnije razrađeni u nastavku. Također su poznati pod nazivom „FRP“ (Fibre Reinforced Polymers) ovi kompozitni materijali koriste matricu baziranu na duromernim polimerima i različitim vrstama vlakana (staklena, aramidna i ugljična) kao ojačalima.

**Metalni kompozitni (MMC)** – sve više se mogu pronaći u automobilskoj industriji, ovi materijali koriste metal kao matricu (npr. aluminij) s vlaknima proizvedenim od npr. SiC (silicijev karbid) kao ojačalima.

**Keramički kompoziti (CMC)** – koriste se u visokotemperaturnim okolinama, ovi kompoziti koriste keramičke materijale kao matricu te vrlo kratka vlakna kao ojačala proizvedena od npr. SiC i BN (borov nitrid).

### 3. Polimerni kompoziti (PMC)

Duromeri sastava na bazi epoksidnih i poliesterskih smola imaju ograničenu uporabu za proizvodnju konstrukcija i njihovih dijelova, jer njihova mehanička svojstva nisu dovoljno dobra u usporedbi s većinom metala. Dakako, imaju poželjna svojstva posebice zbog njihove sposobnosti oblikovanja u složenu geometriju (oblik).

Materijali kao što su staklo, aramid i bor posjeduju ekstremno visoke vrijednosti vlačne i tlačne čvrstoće no u „krutom obliku“ povećanje geometrije ta svojstva su narušena. Činjenica je da uslijed opterećenja ovih materijala većih dimenzija, površinske i druge nesavršenosti propagiraju te stvaraju pukotine za koje je posljedica lom materijala koji nastaje ispod vlačne čvrstoće  $R_m$ .

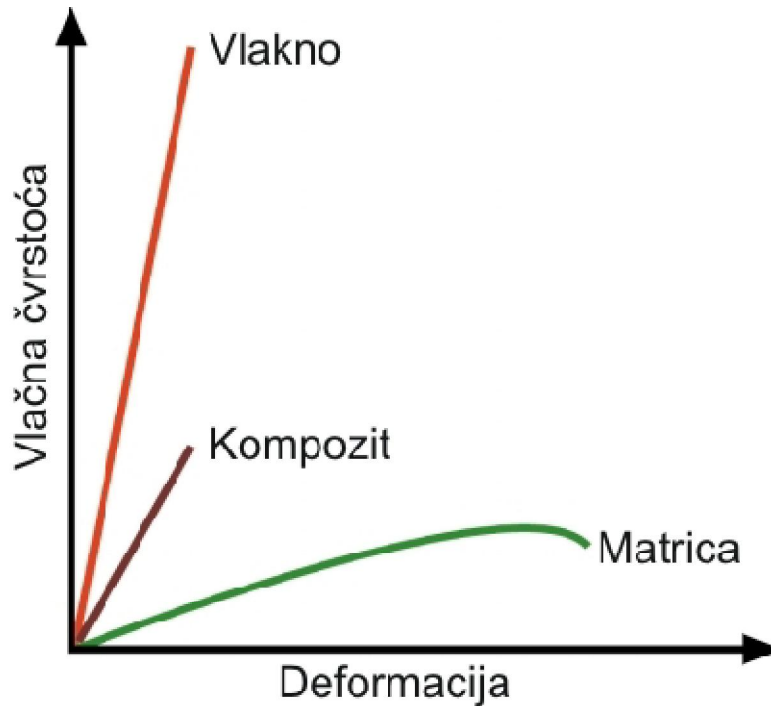
Kako bi se ova pojava nadvladala, materijal se proizvodi u obliku vlakana, čime se pojava loma zbog nesavršenosti svodi na manji broj vlakana a time se zadržava čvrstoća materijala.

Iznimna svojstva materijala dobiti će se kombinacijom matrice (duromer) i ojačala najčešće u obliku staklenih, aramidnih ili ugljičnih vlakana, gdje je zadaća matrice; prenošenje opterećenja na vlakna, odvajanje vlakana jednih od drugih u svrhu sprječavanja širenja pukotine u materijalu, formiranje kompozitne konstrukcije te zaštita kompozitne konstrukcije od utjecaja okoline.

Visoka čvrstoća i krutost, jednostavnost izrade zahtjevne geometrije oblika, visoka otpornost na utjecaje iz okoline spregnuto s malom masom, čini kompozitni materijal superiornijim nad metalnim materijalima u različitim primjenama.

Kako polimerni kompoziti objedinjuju matricu i ojačalo, svojstva kompozitnog materijala objedinit će tako dio svojstava matrice i ojačala.





Slika 1 Svojstva materijala matrice, vlakna i kompozita u cjelini [1]

Svojstva kompozita određena su:[1]

- Svojstvima vlakna
- Svojstvima matrice
- Volumnim udjelom vlakana u matrici
- Geometrijom i orijentacijom vlakana u matrici

O prva dva svojstva detaljnije će se u nastavku pisati. Volumni udio vlakana uglavnom je definiran tehnologijama izrade kojima se vlakna impregniraju matricom u kompozit o kojima će u nastavku rada biti riječ. Dakako, ovisit će i o vrsti duromera (smole) i formi (raspored) vlakana u matrici. Općenito, kako su mehanička svojstva vlakana bolja od onih matrice, veći volumni udio vlakana u kompozitu rezultirat će boljim svojstvima samog kompozita i obrnuto. U praksi postoje granice kako je potrebno da vlakna budu svom površinom impregnirana

matricom. U protivnome, prilikom proizvodnje tj. impregniranja većeg volumena vlakana matricom mogu se pojaviti nesavršenosti i uključci zraka što će narušiti svojstva kompozita a time postati koncentracije naprezanja koje kasnije mogu izazvati lom kompozita. Maksimalni volumni udio vlakana u matrici uz „optimalna“ svojstva iznosi <70%.

Važno je napomenuti da kod metala, svojstva materijala malo ovise proizvođaču/dobavljaču, te osoba koja proizvodi gotovu konstrukciju nema mogućnost promjene svojstava materijala tijekom proizvodnje. Međutim, kompozitni materijal i njegova svojstva formiraju se istodobno s procesom proizvodnje, što će reći, da osoba koja proizvodi konstrukciju sama kreira svojstva kompozitnog materijala koji će biti ili je dio konstrukcije. Dakako da je ta faza od krucijalne važnosti kod formiranja i proizvodnje gotove kompozitne konstrukcije i na to treba staviti poseban naglasak.

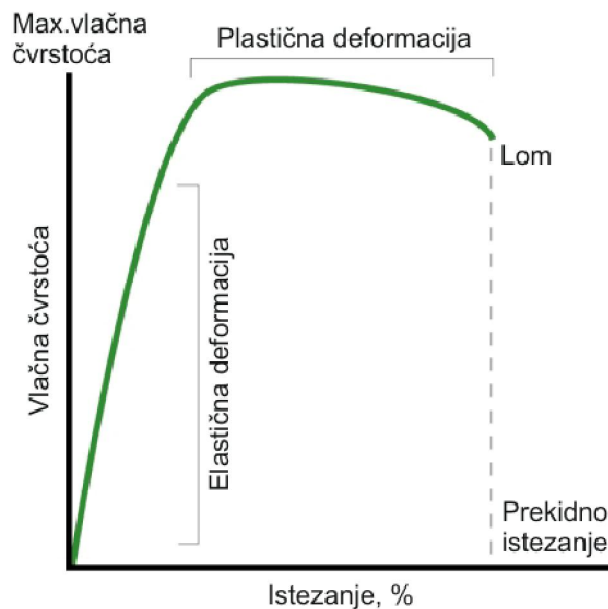
## 4. Matrice

Duromerni materijal za uporabu u izradi kompozitnih materijala kao matrice trebaju posjedovati sljedeća svojstva:[1]

- Dobra mehanička svojstva
- Dobra adhezijska svojstva
- Dobra svojstva čvrstoće
- Dobru otpornost na degradaciju uslijed eksploatacije

### 4.1. Mehanička svojstva matrica

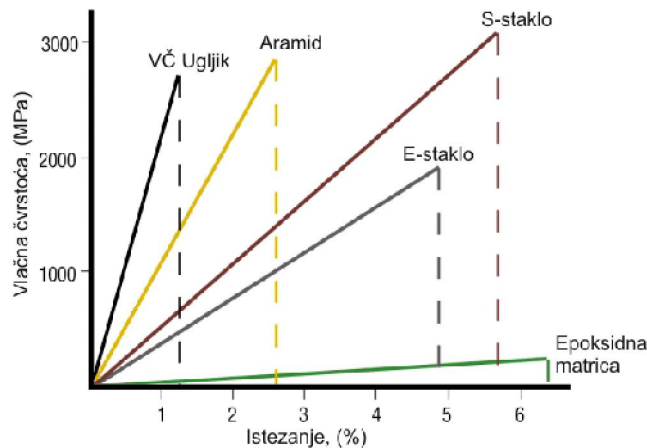
Slika prikazuje dijagram vlačna čvrstoća/istezanje za idealnu matricu. Krivulja za takovu matricu prikazuje maksimalne vrijednosti vlačne čvrstoće, krutosti te prekidne čvrstoće (deformacija pojave loma matrice).



Slika 2 Svojstva materijala [1]

Treba naglasiti kada je kompozit opterećen vlačno, da bi se iskoristila najbolja svojstva vlakna, matrica se mora deformirati najmanje iste ili veće vrijednosti istezljivosti vlakna. Slika prikazuje dijagram vlačna čvrstoća/istezanje za Estaklo, S-staklo, aramid te ugljik visoke čvrstoće. Ovdje se može uočiti, za

primjer, da će S-staklo, sa istezljivosti 5,3%, zahtijevati matricu istezljivosti najmanje iste vrijednosti da bi se postigla maksimalna vlačna svojstva kompozita.



Slika 3 Svojstva materijala vlakana i matrice [1]

## 4.2. Adhezijska svojstva matrice

Visoka adhezijska svojstva između matrice i vlakana prijeko su potrebna da bi se osigurao prijenos naprezanja s matrice na vlakna te time spriječile pukotine matrice/vlakana koje bi rezultiralo odvajanjem vlakana od matrice prilikom opterećenja.

## 4.3. Svojstva žilavosti matrice

Žilavost je svojstvo materijala da se odupire propagiranju pukotine, no kod kompozita to svojstvo teško je odrediti. Generalno, što veću deformaciju materijal matrice može podnijeti prije pojave pukotine to će ona biti žilavija i otpornija na pucanje. Obratno, što je materijal matrice manje žilav, kompozit proizveden od istog, biti će krhkiji i skloniji pucanju. Važno je ova svojstva povezati sa svojstvima vlakana impregniranih u materijal matrice.

#### **4.4. Eksploatacijska svojstva matrice**

Dobra otpornost na okolišne uvijete u eksploataciji, vodu i ostale agresivne medije, uz sposobnost izdržavanja cikličkog opterećenja, svojstva su koja matrica kompozitnog materijala mora zadovoljavati. Ova svojstva vrlo su važna u uvjetima eksploatacije u brodogradnji i sličnoj industriji.

#### **4.5. Vrste materijala matrice kompozita**

Svi polimeri izlažu važno zajedničko svojstvo, a to je da se sastoje od dugih lanaca molekula sastavljenih od mnogo ponavljanih jedinica (mera). Polimeri se tako u ovom slučaju mogu razvrstati u termoplaste i duromere ovisno o svojstvima koje pokazuju zagrijavanjem.

Termoplasti, kao metali, mekšaju i tale se prilikom zagrijavanja te hlađenjem otvrdnjavaju. Tako, proces prelaženja između temperature skrućivanja i taljenja može se ponavljati teoretski nebrojeno puta bez da se naruše svojstva materijala.

Duromeri se formiraju iz kemijske reakcije in situ, gdje su smola i otvrdnjivač ili smola i katalizator zamiješani međusobno te se tako nepovratnom kemijskom reakcijom skrućuju. Kod nekih duromera kao što su fenolne smole, postoje lako isparavajuće komponente aktivirane povišenim temperaturama (kondenzacijska reakcija). Druge vrste smole kao što su poliesterske i epoksidne skrućuju se mehanizmom adicijske reakcije.

Tako skrućeni, duromeri više ne mogu poprimiti tekuće stanje zagrijavanjem, međutim zagrijavanjem, njihova svojstva bitno će se narušiti. Temperatura o kojoj je riječ je „temperatura staklišta“ ( $T_g$ ). Iznad temperature staklišta, molekularna struktura duromera se mijenja iz krute kristalaste strukture u strukturu amornog polimera manje krutosti. Promjena je reverzibilna u slučaju hlađenja ispod temperature staklišta  $T_g$ . Iznad temperature  $T_g$ , svojstvo kao što je krutost, znatno opada a kao posljedica tome, tlačna i posmična čvrstoća također. Ostala svojstva kao što je vodonepropusnost također su izrazito smanjena temperaturom iznad temperature  $T_g$ .

Unatoč postojanju različitih tipova smola koje se koriste u industriji kompozita, većina konstrukcija i njihovih strukturnih elemenata izrađeni su od tri osnovne vrste kao što su poliesterske, vinilesterske i epoksidne.

U nastavku detaljno su obrađena svojstva matrice od epoksidnih smola iz razloga svojih daleko najboljih svojstava u odnosu na ostale navedene vrste te njihove primjene.

#### **4.6. Epoksidne smole**

Epoksidne smole uglavnom su svojim mehaničkim svojstvima, otpornošću na degradaciju u eksploataciji bolje od ostalih tipova smola. To ih čini gotovo izuzetnim za uporabu u zrakoplovnim konstrukcijama. Svojstvo lakog laminiranja uz odlična adhezijska svojstva te otpornost na upijanje i zadržavanje vlage čine ovu vrstu smole idealnu za primjenu u brodograđevnoj industriji. Ovdje su epoksidne smole u širokoj upotrebi kao primarni konstrukcijski materijal u izradi brodova visokih performansi (jedrilice, čamci i sl.), kao sekundarni koriste se kao obloga trupa ili zamjena materijala sklonih degradaciji uslijed djelovanja vlage i vlažnog okoliša. Epoksidne smole uglavnom se isporučuju tekuće, kao dvokomponentne, gdje se zamješavanjem ostvaruje kemijska reakcija koja nakon određenog vremena rezultira skrućivanjem.

#### **4.7. Geliranje i skrućivanje**

Povećanjem količine katalizatora ili dodataka za skrućivanje, smola postaje viskoznija do trenutka kada više nije tekuća te prestaje „teći“. Ovo svojstvo naziva se „gel point“, smola poprima svojstva gela. Smola se i dalje nastavlja skrućivati iz stanja gela, gdje na kraju poprima krajnju tvrdoću i sva svojstva matrice. Cjelokupan opisan proces naziva se skrućivanje smole u matricu. Ovaj proces odvija se uglavnom pri sobnim temperaturama. Postoji također mogućnost odvijanja procesa pri povišenim temperaturama što rezultira ubrzanim skrućivanjem te povišenjem mehaničkih svojstava nakon skrućivanja. Iskustveno, praksa je pokazala da povišenjem temperature odvijanja procesa za 10°C ubrzava proces skrućivanja za 100%. Postoji i mogućnost podvrgavanja povišenim temperaturama nakon skrućivanja što se još naziva

„post cure process“, gdje se i time također omogućuje povišenje mehaničkih svojstava. Povećanjem temperature odvijanja procesa skrućivanja povećava se i temperatura staklišta ( $T_g$ ).

#### **4.8. Usporedba svojstava materijala matrice**

Izbor materijala matrice tj. smole za upotrebu u izradi kompozitnih laminata ovisi o nekoliko stavki koje su karakteristične za sve kompozitne konstrukcije:

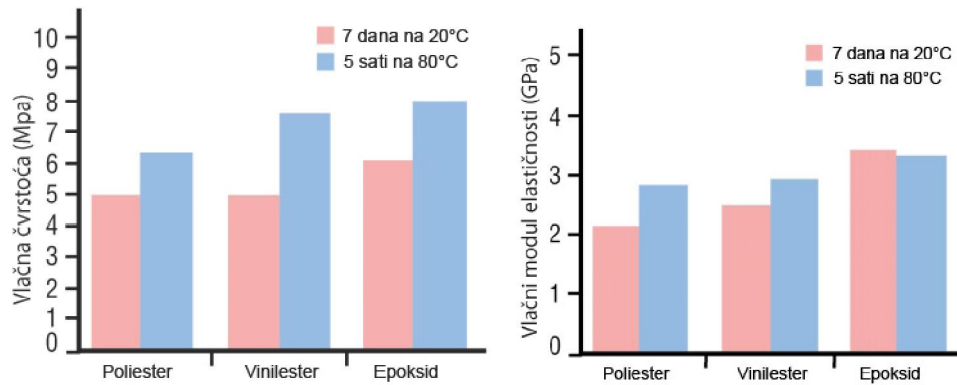
- Adhezijska svojstva
- Mehanička svojstva
- Otpornost stvaranju mikropukotina
- Otpornost na umor materijala
- Otpornost na prodiranje medija

#### **4.9. Adhezijska svojstva**

Već je prethodno objašnjeno kako su adhezijska svojstva matrice značajna za definiranje mehaničkih svojstava kompozita. Generalno, poliesterske matrice imaju najlošija adhezijska svojstva od spomenutih najznačajnijih tri vrste matrica. Vinilesterske matrice pokazuju bolja svojstva naspram poliesterskih, međutim, epoksidne matrice pokazuju najznačajnija adhezijska svojstva te ih se može naći u različitim namjenama kao visokočvrsti adhezivi. Čvrstoća veze između matrice i vlakana ne ovisi samo o adhezijskim svojstvima matrice već i stanju površine vlakana što će biti opisano u poglavlju „ojačala“.

#### **4.10. Mehanička svojstva**

Dva osnovna mehanička svojstva matrica su vlačna čvrstoća i krutost. Slika 4. i Slika 5. prikazuju rezultate ispitivanja poliesterskih, vinilesterskih i epoksidnih smola skrućenih u matricu pri temperaturama od  $20^{\circ}\text{C}$  i  $80^{\circ}\text{C}$ .



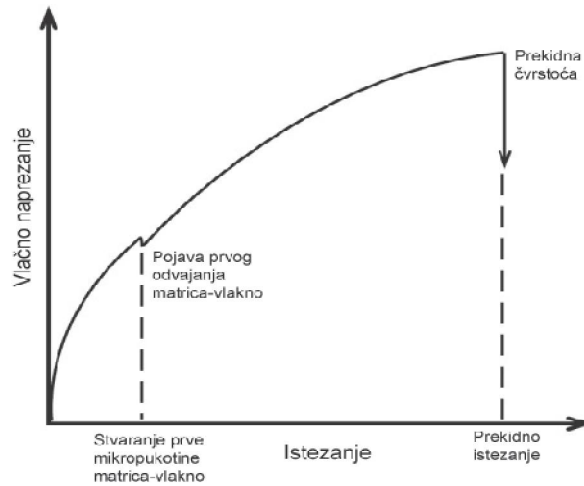
Slika 4 Usporedba vlačne čvrstoće [1], Slika 5 Usporedba vlačnog modula [1]

Nakon perioda skrućivanja u trajanju od 7 dana na sobnoj temperaturi, može se uočiti da epoksidna matrica ima mnogo bolja svojstva od poliesterskih i vinilesterskih matrica u oba slučaja. Jednako važno za konstruktore je i iznos skupljanja prilikom skrućivanja smole u matricu. To je pojava preraspodjele molekula u procesu skrućivanja kada smola ima svojstva tekuće faze i gela. Poliesterske i vinilesterske smole tako se skupljaju prilikom skrućivanja u matricu u iznosima do 8%, dok se epoksidne smole skupljaju samo do 2%. Stoga epoksidne matrice imaju bolja mehanička svojstva od ostalih dviju vrsta, te također manju pojavu zaostalih naprezanja prilikom skrućivanja koja se u eksploataciji mogu aktivirati.

#### 4.11. Otpornost stvaranju mikro-pukotina

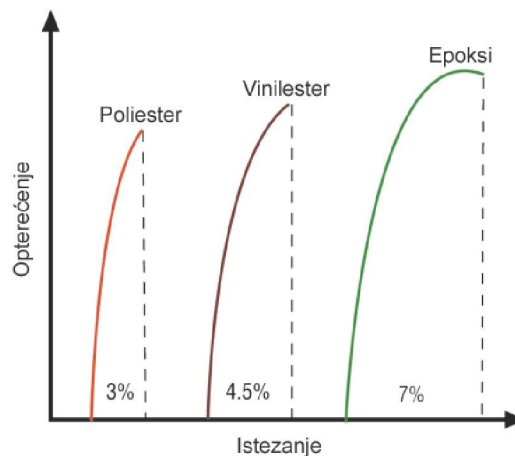
Pod terminom čvrstoće kompozitnog laminata podrazumijeva se koliko opterećenja laminat može podnijeti prije negoli pretrpi potpun lom. Granica razvlačenja kompozitnog laminata je točka kada dolazi do pucanja matrice i vlakana. Dakako, prije negoli dođe do postizanja prekidne čvrstoće kompozitnog laminata, laminat će pretrpjeti opterećenje kod kojeg dolazi do pojave prve mikro-pukotine u matrici, Slika 6. Razumljivo je da će prije doći do loma matrice nego loma vlakana zbog svojstva čvrstoće materijala. Zaključak je dakle, inženjer projektant, koji želi trajnu i izdržljivu konstrukciju, mora osigurati da opterećenja na laminat ne prelaze granicu prethodno utvrđenih vrijednosti na koja je projektiran.





Slika 6 Vlačno opterećenje kompozitnog laminata [1]

Istezanje koje laminat može postići prije pojave prve pukotine ovisi o žilavosti i adhezijskim svojstvima matrice. Dobro poznata adhezijska svojstva matrice pomažu laminatu ostvariti veću otpornost na pojavu mikropukotina. Na slici 7. dana je usporedba svojstava materijala poliesterskih, vinilesterskih i epoksidnih matrica:



Slika 7 Usporedba svojstava materijala matrica [1]

#### 4.12. Otpornost na umor materijala

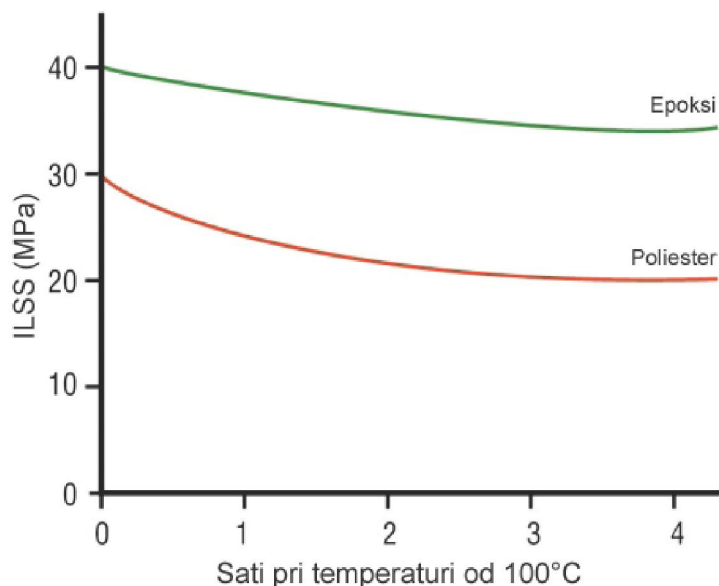
Kompozitni materijali pokazuju dobru otpornost na umor materijala u usporedbi s metalima. Kako je umor materijala rezultat postupnog nakupljanja malog broja oštećenja, umor kompozitnog materijala uvjetovan je žilavošću matrice, otpornosti na pojavu mikropukotine, te količini praznina ili uključaka koji se

javljaju tijekom procesa proizvodnje kompozitnih struktura ili konstrukcija. Kompozitni laminati bazirani na epoksidnim matricama teže jako dobroj otpornosti na umor materijala u usporedbi s laminatima baziranim na poliesterskim i vinilesterskim matricama. Ovo je jedan od ključnih razloga zašto se ovakve vrste kompozitnih laminata koriste u zrakoplovnoj industriji.

#### 4.13. Otpornost na prodiranje medija

Važno svojstvo svake matrice, pogotovo u eksploataciji u brodogradnji, je svojstvo otpornosti na degradaciju uslijed prodiranja medija (vlaga, voda...). Svaki materijal matrice upiti će nešto vlage/vode te time povećati masu kompozitne konstrukcije, no ono što je značajnije je kako ta vlaga/voda utječe na čvrstoću matrica-vlakno i da li će dugotrajno razmatrajući narušiti interlaminarna svojstva.

Za poliesterske matrice može se očekivati da će u tom slučaju uspjeti zadržati 65% interlaminarne smične čvrstoće (ILSS) dok će za isto vrijeme, epoksidne matrice zadržati 90%.



Slika 8. Svojstva kompozitnih laminata nakon uranjanja u vodu pri 100°C [1]

Slika 8. Prikazuje svojstva poliesterskih i epoksidnih smola ojačanih staklenim vlaknima nakon određenog perioda uronjenih u vodu pri temperaturi od 100°C.

Ova povišena temperatura ima za svojstvo ubrzavanja procesa degradacije za uronjene laminate.

#### 4.14. Sažetak i pregled svojstava materijala matrica

Materijal matrice	Prednosti	Nedostaci
Poliester	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jednostavan za uporabu</li> <li>• cijena</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• umjerena mehanička svojstva</li> <li>• visoke emisije plinova (stiren) prilikom skrućivanja u otvorenim kalupima</li> <li>• visoke vrijednosti stezanja prilikom skrućivanja</li> <li>• -limitiran vijek trajanja proizvoda</li> </ul>
Vinilester	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visoka otpornost na kemijske utjecaje</li> <li>• Visoka otpornost na eksploatacijske utjecaje</li> <li>• Bolja mehanička svojstva od poliesterskih</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Za bolja mehanička svojstva potreban „post cure“ proces</li> <li>• Visok udio stirena</li> <li>• Viša cijena nego kod poliesterskih</li> <li>• Visoke vrijednosti stezanja prilikom skrućivanja</li> </ul>
Epoksi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visoka mehanička i toplinska svojstva</li> <li>• Visoka otpornost na prodor medija</li> <li>• Laka uporaba uz kratko vrijeme</li> <li>• Niske vrijednosti skupljanja kod skrućivanja</li> <li>• Uporabne temperature 140°C vlažno/220°C Suho</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Skuplji nego vinilesterski</li> <li>• Zamješavanje komponenti</li> <li>• Skloniji koroziji</li> </ul>

Tabela 1. Pregled svojstava materijala matrice

## 5. Vlakna

### 5.1. Staklena vlakna

Staklena vlakna najkorištenija su ojačala današnjice (slika 9). Jednostavno se izrađuju iz sirovina koje su lako dostupne, a imaju svojstva kao što su tvrdoća, kemijska otpornost, stabilnost, čvrstoću, fleksibilnost i krutost. Staklena vlakna koriste se kao ojačala za kompozite i za druge specijalne izratke.



Slika 9. Staklena vlakna [2]

#### 5.1.1. Proizvodnja staklenih vlakana

Staklena taljevina se dobiva taljenjem silicija i minerala. Taljevina sadrži okside koji su potrebni da bi se dobili pravilni oblici. Taljevina se brzo hladi kako bi se spriječila kristalizacija i tako se formirala. Sva se kontinuirana vlakna izrađuju vučenjem, a zatim se taljevina oblikuje ekstrudiranjem kroz nekoliko tisuća rupica promjera od 0,793 mm do 3,175 mm. Dok su još visoko viskozna vlakna se brzo fino obrađuju vučenjem i zatim se skrutnjaju. Promjeri vlakana se kreću od 3  $\mu\text{m}$  do 20  $\mu\text{m}$ .

Drugi način proizvodnje staklenih vlakana je oblikovanje staklenih kuglica iz taljevine stakla. Promjer kuglica je od 2 cm do 3 cm. Kuglice se ponovno tale i iz taljevine oblikujemo staklena vlakna. Ovim načinom proizvodnje dobivamo vlakna visoke čvrstoće.

### 5.1.2. Vrste staklenih vlakana

Staklena vlakna svrstavaju se u dvije kategorije. Prva kategorija su staklena vlakna niske cijene i opće primjene, a druga kategorija su staklena vlakna za specijalne primjene. Više od 90 % staklenih vlakana je za opću primjenu i ta se stakla označavaju kao E-stakla. Ostale vrste staklenih vlakana koriste se za specijalne primjene.

Oznake staklenih vlakana :

- E – niska električna vodljivost
- S – visoka čvrstoća
- C – visoka kemijska otpornost
- M – visoka krutost
- A – alkalna stakla
- D – niska dielektrična konstanta

### 5.1.3. E–staklena vlakna

Postoje dvije vrste E–stakla, prva su stakla s borom ( B ), a druga bez bora.

E–staklo sadrži od 5 % do 6 % bor-oksida. Zbog štetnog utjecaja bor-oksida na okolinu počela su se koristiti E–stakla koja ne sadrže bor-oksid.

Komercijalna bor E–stakla dolaze u dvije varijante. Prva varijanta ima kemijski sastav  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$ , a druga varijanta ima kemijski sastav  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ .

Temperatura oblikovanja E–stakla sa sadržajem bora iznosi od 1140°C do 1185°C . Temperatura taljenja iznosi od 1050°C do 1064°C, a temperatura omekšanja oko 850°C. Temperatura oblikovanja E–stakla bez sadržaja bora iznosi od 1250°C do 1264°C, a temperatura taljenja iznosi od 1146°C do 1180°C. Temperatura omekšanja iznosi oko 916°C.

Modul elastičnosti kod E–stakla bez bora je oko 5% viši nego kod E–stakla sa borom dok je vlačna čvrstoća (  $R_m$  ) približno jednaka.

Kemijska otpornost E–stakla bez bora je sedam puta veća nego kod E–stakla sa borom. E– stakla bez bora imaju malo veću gustoću, koja iznosi  $2,62 \text{ g/cm}^3$ , od E–stakla s borom, koja iznosi  $2,55 \text{ g/cm}^3$ . Također E–stakla bez bora imaju malo višu dielektričnu konstantu ( 7,0 ) od E – stakla s borom koja iznosi od 5,9 do 6,6.

#### **5.1.4. Specijalna staklena vlakna**

Specijalna staklena vlakna uključuju staklena vlakna s visokom korozivskom otpornošću ( ECR stakla ), s visokom čvrstoćom ( S, R, T stakla ), sa slabom dielektričnom konstantom (D-stakla), vlakna visoke čvrstoće i silikatna ili kvarcna vlakna koja imaju visoku temperaturnu primjenu. Ostala specijalna staklena vlakna su A-stakla i C-stakla.

Korozivska postojanost staklenih vlakana ovisi o njihovoj kemijskoj strukturi. ECR staklena vlakna imaju visoku otpornost na kiseline. Dodaci ZnO i  $\text{TiO}_2$  E–staklu bez sadržaja bora dodatno poboljšavaju otpornost na koroziju ECR staklenih vlakana.

Staklena vlakana (S, R, T) imaju od 10% do 15% višu čvrstoću od E-staklenih vlakana. Također imaju višu temperaturu oblikovanja, više talište pa je potrebno uložiti više energije za njihovu izradu. Ova stakla koriste se u vojne svrhe.

U tablici 2 su prikazane vrijednosti fizikalnih i mehaničkih svojstava staklenih vlakana.

Vlakno	Talište, °C	Temperatura omeškavanja, °C	Vlačna čvrstoća, MPa	Modul elastičnosti, GPa
Bor E - staklo	1065-1077	830-860	3100-3800	76-78
E – staklo	1200	916	3100-3800	80-81
ECR – staklo	1159	880	3100-3800	80-81
D – staklo	...	770	2410	...
S - staklo	1500	1056	3400	69

Tablica 2. Fizikalna i mehanička svojstva staklenih vlakana [1]

## 5.2. Ugljična vlakna

Uporaba ugljičnih vlakana ubrzano raste zbog smanjenja cijena i povećanja mogućnosti nabave tijekom devedesetih godina prošloga stoljeća. Zbog poboljšanja omjera svojstava i cijene, kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima danas imaju primjenu u automobilskoj, naftnoj, građevinskoj industriji. Na slici 10 su prikazana ugljična vlakna.

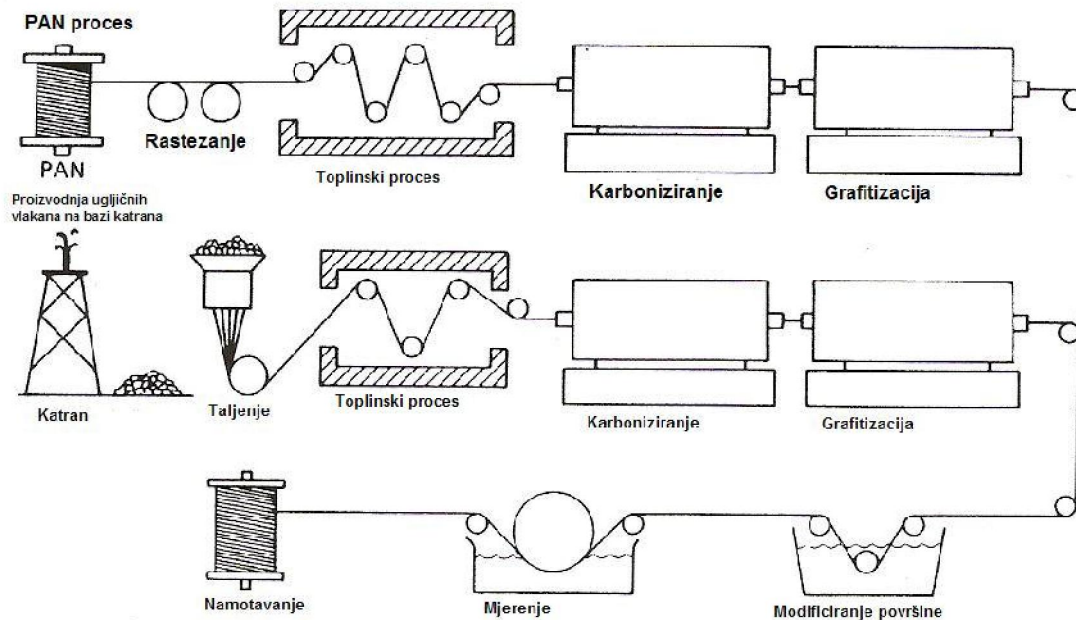


Slika 10. Ugljična vlakna [2]

### 5.2.1. Proizvodnja ugljičnih vlakana

Sirovine koje se koriste za ugljična vlakna su poliakrilonitril, (PAN), katran i celuloza. Sama proizvodnja vlakana od različitih sirovina različita je, ali temeljni procesi kao što su namotavanje, stabiliziranje, karboniziranje i oblikovanje na određenu mjeru isti su. Na slici 11. prikazani su procesi izrade vlakana.





Slika 11. Proizvodnja PAN vlakana i vlakana na bazi katrana [3]

### 5.2.2. Poliakrilonitrilna ugljična vlakna (PAN vlakna)

Većina ugljičnih vlakana koja se danas koriste su na osnovi PAN-a. Proizvodnja sirovine je izvedena namotavanjem PAN polimera u vlakna različitih varijanti. PAN vlakna su bijele boje, približne gustoće  $1,17 \text{ g/cm}^3$ . Stabilizacija se sastoji od istezanja i grijanja PAN vlakana pri  $200^\circ\text{C}$  do  $300^\circ\text{C}$  u kisikovoj atmosferi. Istezanje poslije namotavanja i tijekom stabilizacije omogućava visoko orijentiranu molekularnu strukturu pomoću koje se povećava modul elastičnosti ( $E$ ) i vlačnu čvrstoću ( $R_m$ ).

Karboniziranje vlakana se sastoji od pirolize pri temperaturi od  $1000^\circ\text{C}$  do  $1500^\circ\text{C}$  u inertnoj atmosferi koja se sastoji od 95% ugljika. Odmah nakon karboniziranja provodi se dodatna toplinska obrada za dobivanje visokomodulnih ugljičnih vlakana. Tijekom karboniziranja, vlaknima se smanjuje promjer i gube približno 50% mase.

Nakon karboniziranja, vlakna se podvrgavaju površinskoj obradi da bi površina bila čista i kako bi se vlakna bolje spojila s matricom.

### 5.2.3. Ugljična vlakna na osnovi katrana

Katran je kompleksna mješavina, a može se dobiti od petroleja, ugljena, asfalta ili PVC-a. Odabir sirovine je važan zbog konačnih svojstava vlakana. Katran mora biti predobrađen kako bi očuvao željenu viskoznost i molekularnu masu i kao takav pripremljen za izradu visoko kvalitetnih vlakana. Izrada vlakana je slična izradi PAN vlakana.

### 5.2.4. Ugljična vlakna na osnovi celuloze

Proces izrade vlakana na bazi svile je sličan izradi PAN vlakana. Jedina razlika u procesu izrade su parametri procesa.

### 5.2.5. Svojstva ugljičnih vlakana

Kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima su pet puta čvršći od nekih konstrukcijskih čelika i pet puta lakši. U usporedbi s aluminijem ugljična vlakna sedam puta su čvršća, dva puta kruća i lakša. Kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima imaju otpornost na umor bolje od većine poznatih metala, a kad se spoje sa odgovarajućom smolom, kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima posjeduju izvanrednu otpornost na koroziju. Vlakna na osnovi PAN-a i na osnovi katrana ne omekšavaju pri povišenoj temperaturi. Primjenjuju se za dijelove koji rade pri visokim temperaturama kao što su mlaznice raketa i kočnice zrakoplova.

Njihova čvrstoća povisuje se s porastom temperature u atmosferi bez kisika. Ova svojstva su rezultat mikrostrukture vlakana u uzdužnom i poprečnom smjeru.

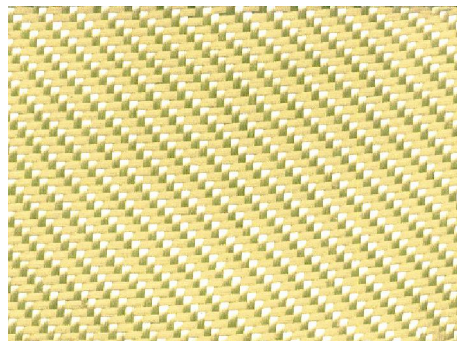
U tablici 3 su prikazane vrijednosti mehaničkih svojstava ugljičnih vlakana.

Vlakno	Modul elastičnosti, GPa	Vlačna čvrstoća, MPa	Toplinska vodljivost, W/mK	Produljenje pri lomu, %	Gustoća, g/cm <sup>3</sup>
PAN-ugljično vlakno	345-448	3450-5520	50-80	0,7-1,0	1,9
Ugljično vlakno na katranskoj osnovi	690-965	2410	400-1100	0,4-0,27	2,2

Tablica 3. Maksimalne vrijednosti nekih mehaničkih svojstava [1]

### 5.3. Aramidna vlakna

Aramidno vlakno je aromatski poliamid, poli(p-fenilen-tereftalamid), koji ima bolji omjer čvrstoće i težine od bilo kojeg drugog vlakna za ojačavanje. Prva aramidna vlakna pod trgovačkim nazivom Kevlar su se upotrebljavala za ojačavanje automobilskih guma i polimera. Zbog male mase, visoke čvrstoće i žilavosti danas se upotrebljavaju za protubalističke dijelove, užadi, kablove, automobilske gume. Na slici 12. su prikazana aramidna vlakna



Slika 12. Aramidna vlakna [2]

#### 5.3.1. Svojstva aramidnih vlakana

Zbog kemijskog sastava aramidna vlakna imaju visoku toplinsku stabilnost, a također imaju i nisku toplinsku vodljivost. Aramidna vlakna otporna su na umor.

Aramidna vlakna pod trgovačkim nazivom Kevlar 49 najvažniji su oblik tih vlakana koji se danas upotrebljava za ojačanje kompozita zbog njihovog visokog modula elastičnosti. Kevlar 29 upotrebljava se za kompozite s visokom žilavosti ili protubalističkim svojstvima.

U tablici 4. su prikazana neka svojstva aramidnih vlakana.

Vlakno	Gustoća, g/cm <sup>3</sup>	Modul elastičnosti, GPa	Vlačna čvrstoća, GPa	Produljenje, %
Kevlar 29	1,44	83	3,6	4,0
Kevlar 49	1,44	131	3,6-4,1	2,8
Kevlar 149	1,47	179	3,4	2,0

Tablica 4. Svojstva nekih aramidnih vlakana [1]

## 5.4. Keramička vlakna

Kontinuirana se keramička vlakna u komercijalnoj uporabi za ojačavanje kompozita s keramičkom matricom dijele na oksidna vlakna i neoksidna vlakna. Promjer vlakana je manji od 20 µm.

### 5.4.1. Svojstva oksidnih vlakana

Oksidna vlakna mogu se podijeliti na aluminij-silikatna vlakna ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ) i na aluminijska vlakna ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ). Aluminij-silikatna vlakna imaju nižu čvrstoću, niži modul elastičnosti i toplinsku stabilnost od aluminijskih vlakana. Zbog toga se aluminijska vlakna češće upotrebljavaju za ojačanje kompozitnih dijelova s keramičkom i metalnom matricom. Također, viša čvrstoća i niža krutost aluminijskih vlakana pružaju bolju otpornost na lom i veću fleksibilnost.

### 5.4.2. Svojstva neoksidnih vlakana

Neoksidna keramička vlakna (SiC) upotrebljavaju se za ojačavanje kompozita s keramičkom matricom. Zbog njihove visoke cijene i zbog činjenice da se moraju zaštititi od oksidirajuće atmosfere, SiC vlakna nisu još dosegla upotrebljivost oksidnih vlakana. Keramički kompoziti poput C/SiC upotrebljavaju se pri visokim temperaturama. Primarna metoda proizvodnje SiC vlakana promjera manjim od 20  $\mu\text{m}$  i promjera većim od 50  $\mu\text{m}$  je CVD postupak.

U tablici 5 su prikazana svojstva keramičkih vlakana

Vlakno, trgovački naziv	Gustoća, $\text{g/cm}^3$	Promjer vlakana, $\mu\text{m}$	Cijena, \$/kg	Vlačna čvrstoća, MPa	Modul elastičnosti, GPa
Aluminij-silikatna, Altex	3,3	15	330-550	2000	210
$\alpha$ -aluminij, Almax	3,6	10	815	1800	330
SiC, NicalonNL200	2,55	14	2000	3000	220

Tablica 5. Svojstva nekih keramičkih vlakana [1]

### 5.5. Usporedba svojstava materijala vlakana

Uspoređujući međusobno svojstva svih vrsta materijala vlakana vidljivo je da svi imaju svoje prednosti i nedostatke. Na osnovu toga određuje se naravno, koji je pogodniji za određenu vrstu i mjesto primjene. Tablica 6. prikazuje koliko je koje

od svojstava materijala dobro spram drugih i to slovima „A“ kao najbolje svojstvo spram drugih vrsta, te „C“ najlošije.

Svojstvo	Aramid	Ugljik	Staklo
Vlačna čvrstoća	B	A	B
Vlačni modul	B	A	C
Tlačna čvrstoća	C	A	B
Tlačni modul	B	A	C
Savojna čvrstoća	C	A	B
Savojni modul	B	A	C
Udarna čvrstoća	A	C	B
Interlaminarna smična čvrstoća	B	A	A
Gustoća	A	B	C
Otpornost na umor materijala	B	A	C
Otpornost gorenju	A	C	A
Toplinska izolacija	A	C	B
Električna izolacija	B	C	A
Toplinska dilatacija	A	A	A
Cijena	C	C	A

Tabela 6 Usporedba svojstava materijala ojačala [1]

Također, osim opisanih vrsta vlakana postoje i druge vrste koje nisu našle toliku široku primjenu u kompozitnim materijalima, a to su: poliesterska, polietilenska, kvarcna, keramička te prirodna kao što su juta i sisal (agava).

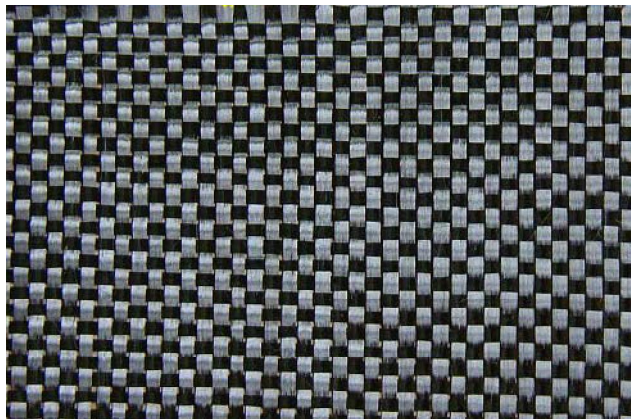
## 6. Ojačala u obliku tkanina

Prednost uporabe ojačala u obliku tkanina je lakše rukovanje, a mehanička svojstva ugljičnih i aramidnih pletiva nadmašuju vrijednosti svojstava koja odgovaraju aluminiju i čeliku u smislu omjera čvrstoće i mase. Različite vrijednosti svojstava moguća su pomoću kombiniranja različitih tkanja.

### 6.1. Jednosmjerna i dvosmjerna pletiva

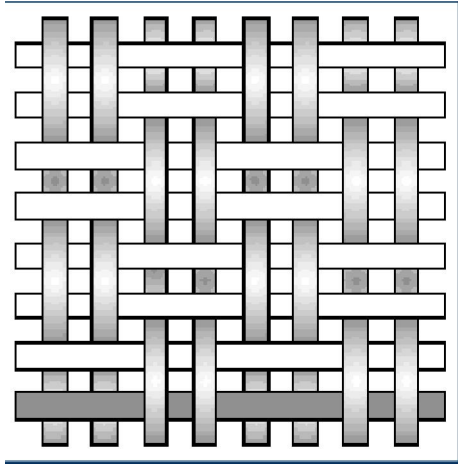
Uzorak tkanine možemo prikazati u  $x, y$  koordinatnom sustavu. Os  $y$  predstavlja savijeno vlakno, to je duljina pletiva koja se može kretati od 30 metara do 150 metara ili od 100 metara do 500 metara. Os  $x$  je poprečna duljina koja se može kretati od 910 mm do 3050 mm.

Najčešća vrsta pletiva kod staklenim vlaknima ojačanog kompozita je platno vez. Platno je temeljni vez s najmanjom jedinicom veza koja je prikazana na slici 13.



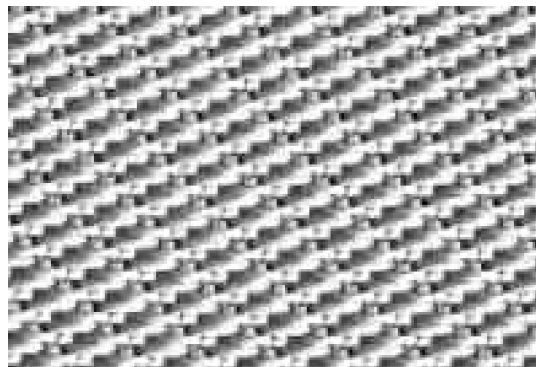
Slika 13. Platno vez [2]

Najjednostavnija konstrukcija sastoji se od četiri valovita vlakna od koja su dva uzdužna i dva poprečna. Platna su najviše isprepletana pa su zbog toga najgušća i najotpornija na opadanje vlakana iz tkanine. Panama vez, koji je varijanta platna, prikazan je na slici 14. Panama vez sastoji se od dvostrukih niti u osnovi s različitim gustoćama (slično kao tkanje košara).



Slika 14. Panama vez [2]

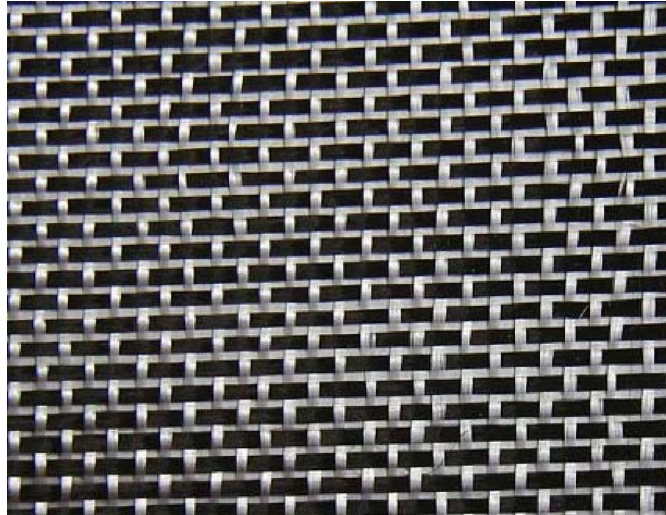
Saten tkanja predstavljaju skupinu pletiva s minimalnom isprepletenošću. Saten tkanine imaju nisku otpornost na ispadanje vlakana iz tkanine i lako se oblikuju na zakrivljenim podlogama kao što je spoj trupa i krila zrakoplova. Ovo je jedan od razloga zbog čega se Saten tkanine upotrebljavaju u zrakoplovstvu. Na slici 15. prikazano je saten tkanje.



Slika 15. Saten tkanje [2]

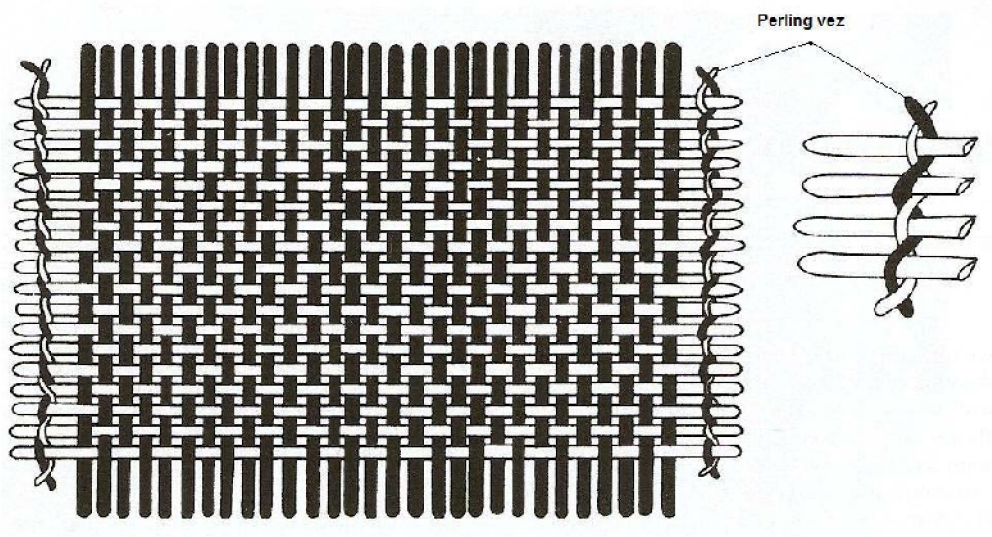
Najbolja mehanička svojstva laminata, mogu se postići, jednosmjernim pletivima koja su usmjerena u smjeru opterećenja. Što je veća isprepletenost, za danu veličinu vlakana, niži je broj vlakana u tkanini. Razmak između vlakana smanjuje njihov broj u tkanini. Zbog tog razloga u tkaninu se mora postaviti što je više moguće vlakana kako bi dobili bolja fizikalna svojstva. Nedostatak je anizotropnost svojstava takvih kompozita pa se zbog toga koriste samo u specijalnim slučajevima. Na slici 16. je prikazano jednosmjerno tkanje.





Slika 16. Jednosmjerna tkanja [2]

Sukljani vez se koristi samo u posebnim slučajevima tkanina, kao što je porublivanje tkanine, a izrađuju se na šivaćim strojevima. Sukljani vez zatvaraju otvorene rubove tkanina. Sukljani vez sprječava paranje ruba tkanine prilikom rukovanja ali nisu dobra za održavanje dobrih fizikalnih svojstava laminata. Na slici 17. je prikazan sukljani vez.



Slika 17. Sukljani vez [3]

## 7. Strukturni kompoziti

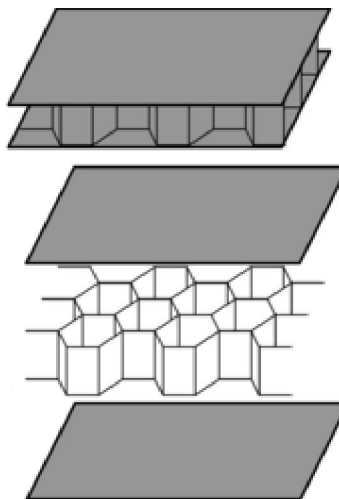
Slojevite kompozitne materijale i sendvič konstrukcije moglo bi se jednom riječi nazvati strukturni kompoziti. Uobičajeno je da su strukturni kompoziti sastavljeni od homogenog i kompozitnog materijala čija svojstva ne ovise samo o svojstvima konstitutivnih materijala, već i o geometrijskom rasporedu elemenata konstrukcije.

Strukturni kompoziti dijele se na:

- Sendvič konstrukcije
- Laminati

### 7.1. Sendvič konstrukcije

Sendvič konstrukcije uključuju složene trodimenzionalne dodatke, jezgre, namijenjene prije svega povećanju čvrstoće i krutosti pri savojnom i smičnom opterećenju, te lokalnom tlačnom opterećenju (slika 18). Jezgre su sa obje strane vezane za oblogu. Sendvič konstrukcije koriste se za izradu dijelova zgrada kao što su krovovi, zidovi, podovi, vrata. Također se koriste u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji.



Slika 18. Prikaz sendvič konstrukcije [2]

## 8. Laminati

Laminati su izrađeni od slojeva različitih vrsta, karakteristika i debljina. Proizvodi izrađeni od laminata mogu biti jednostavni kao što je kompaktni disk, a mogu biti i vrlo komplicirani kao što su skije za snijeg. Najčešće se površinskim slojevima osiguravaju željena svojstva površine kao što su tvrdoća, otpornost na trošenje, otpornost na koroziju i ljepši izgled. Površinski slojevi se nanose sol-gel, CVD i drugim postupcima prskanja.

## 9. Eksperimentalni dio

U svrhu određivanja utjecaja procesa otvrdnjavanja na svojstva kompozita, pripremljeno je više različitih kompozitnih materijala :

Kako bi se ustanovio utjecaj uvjeta (otvrdnjavanja) pripreve kompozita na svojstva provedeno je određivanje žilavosti materijala.

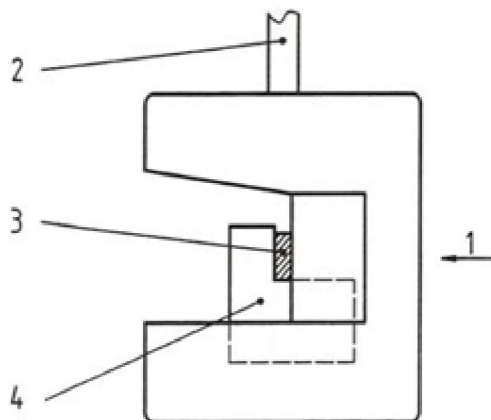
Udarna žilavost određuje se prema normi EN ISO 179-1;2000 na Charpy-evom batu. Različiti parametri prilikom ispitivanja definirani su za razne materijale. Ova metoda primjenjuje se za ispitivanje ponašanja uzoraka pod udarnim opterećenjima. Također ovom metodom možemo usporediti dobivene rezultate za slične tipove materijala.

### 9.1. Način ispitivanja

Epruveta (ispitni uzorak) postavlja se na nosač tako da su krajevi uzorka oslonjeni poput horizontalne grede. Zatim bat slobodnim padom udara u sredinu epruvete. Na slici 19. prikazan je način postavljanja epruvete. Energija kojom bat udara u epruvetu iznosi 4,0 J.

Uređaji za ispitivanje:

- Charpy-ev bat
- pomična mjerka



Slika 19. Charpy-ev bat [2]

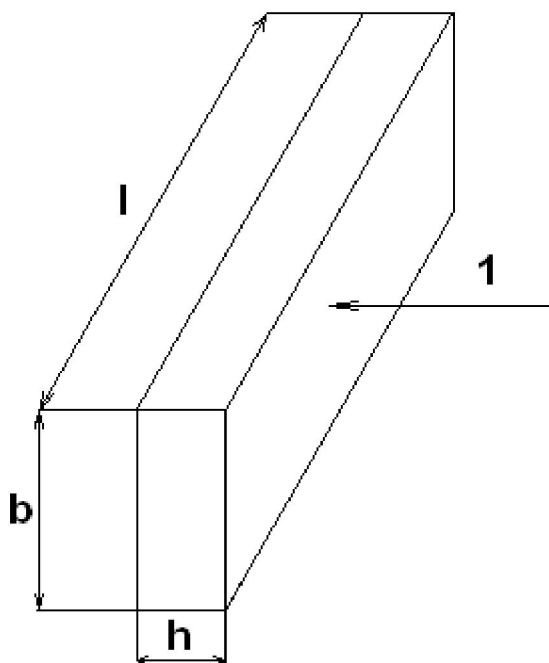
Oznake:

- 1 – Smjer udarca bata
- 2 – Nosač bata
- 3 – Epruveta
- 4 - Oslonac



Slika 20. Charpy-ev bat

Iz ploče, koja je otvrdnjavala pri sobnoj temperaturi, izrezane su dvije epruvete od svakoga uzorka. Oblik epruveta je prikazan na slici 21.



Slika 21. Epruveta za ispitivanje

Oznake:

- $l$  – dužina epruvete
- $b$  – širina epruvete
- $h$  – debljina epruvete
- $1$  – smjer udara

## 9.2. Specifikacije

Standard ispitivanja uzoraka: ISO 179-1 :2000

Proizvodna tehnologija izrade uzoraka: Opterećenje teretom između 2 sloja stakla

Specifikacija tereta: 6 utega, svaki težine od 650g

Tip i materijal matrice uzoraka: Epoksidna smola (proizvođač NOVA)

Tip i materijal ojačala: E-glass stakleno vlakno (proizvođač Kelteks), Aramidno vlakno (Kevlar-proizvođač DUPONT) Ugljično vlakno (proizvođač ZOLTEK)

Tip tkanja materijala ojačala: Keper (eng. TWILL) 200g/m<sup>2</sup> – 400g/m<sup>2</sup>

Broj slojeva tkanine: kombinacija od 2 do 3 sloja ovisno od uzorka

Broj uzoraka: 2 konvencionalno impregniranih

Dimenzije uzoraka su: 20 x 10 x 1

## 9.3. Dimenzije epruvete

Obzirom da je uzorak bio debljine 1 mm epruveta je trebala biti napravljena po ISO normi. (ISO 179-1:2000)

U tablici 7 je prikazana ISO norma za uzorak debljine 1 mm

Tip epruvete	Dužina, l mm	Širina, b mm	Debljina, h mm	Razmak oslonaca mm
2b	25h	10 ili 15 h	1mm	20h

Tablica 7. ISO norma za uzorak debljine 1 mm

## 9.4. Postupak pripreme kompozitnih materijala

Postupak se sastoji od 6 faza:

1. Rezanje tkanine na mjeru
2. Priprema površine za laminiranje kompozitnog laminata
3. Miješanje materijala matrice
4. Impregniranje slojeva kompozitnog laminata
5. Opterećivanje laminata
6. Sušenje

### 9.4.1. Rezanje tkanine na mjeru

Početak pripreme uzoraka sastoji se od rezanja tkanine.

Uzorci se režu škarama na dimenzije otprilike 250 × 250 mm, što je dovoljno za izrezivanje epruveta. Uzorci tkanine režu se iz bale tkanine koju isporučuje proizvođač.



Slika 22 Uzorak tkanine korištene u izradi uzoraka [2]



#### 9.4.2. Priprema površine za laminiranje kompozitnog laminata

Za pripremu uzoraka korištene su staklene ploče dimenzije 500×500 mm koje su prethodno odmaščene sa čistim alkoholom, te od poliranja staklene površine polir pastom. Time se kasnije postiže lakše odvajanje laminata od staklene površine . Staklena površina omogućiti će što ravniju površinu testnih uzoraka.



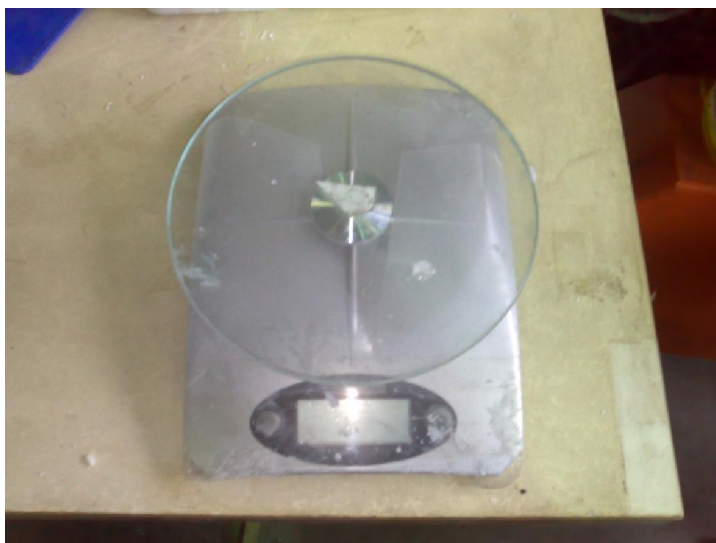
Slika 23 Staklena površina za laminiranje uzoraka

### 9.4.3. Miješanje materijala matrice

Zamješavanje materijala matrice sastoji se od vaganja i zamješavanja dviju komponenata (A i B) dvikomponentne epoksidne smole NOVAPOX UV. Komponente se miješaju u omjeru A:B = 2:1. Potrebno je pripaziti kod slaganja komponenata i dobro ih umiješati. Mjerenje se obavlja na vagi sa preciznošću od 1 grama.



Slika 24 NOVAPOX komponente epoksidne smole



Slika 25 Vaga



Slika 26 Umješavanje komponente epoksidne smole

#### 9.4.4. Impregniranje slojeva kompozitnog laminata

Na staklenu površinu namažemo epoksidnu smolu kako bi izbjegli moguće „džepove smole ili zraka“, te kreće impregniranje jednog po jednog sloja ojačala smolom. Prilikom impregniranja slojeva treba obratiti pažnju da se smola jednoliko i potpuno rasporedi duž cijelog sloja, te da se ne stvore „džepovi smole ili zraka“.



Slika 27 Početak impregniranja prvoga sloja ugljičnih vlakana

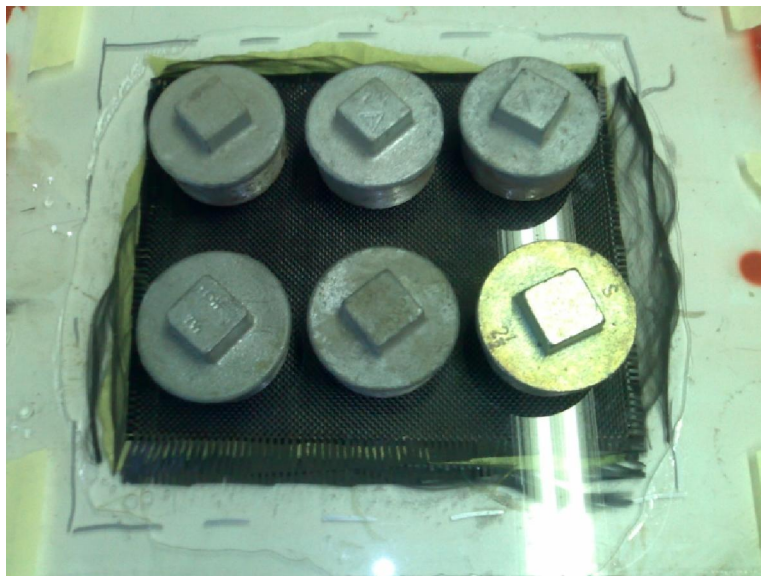
Na slici 28 vidi se nastanak „džepova smole ili zraka“



Slika 28 Impregnirani slojevi

#### 9.4.5. Opterećivanje

Nakon impregniranja slojeva stavljamo drugo staklo i opterećujemo ga ravnomjerno sa 6 utega svaki mase od otprilike 650 g



Slika 29 Opterećeni slojevi



Slika 30 Masa utega za opterećenje

#### 9.4.6. Sušenje

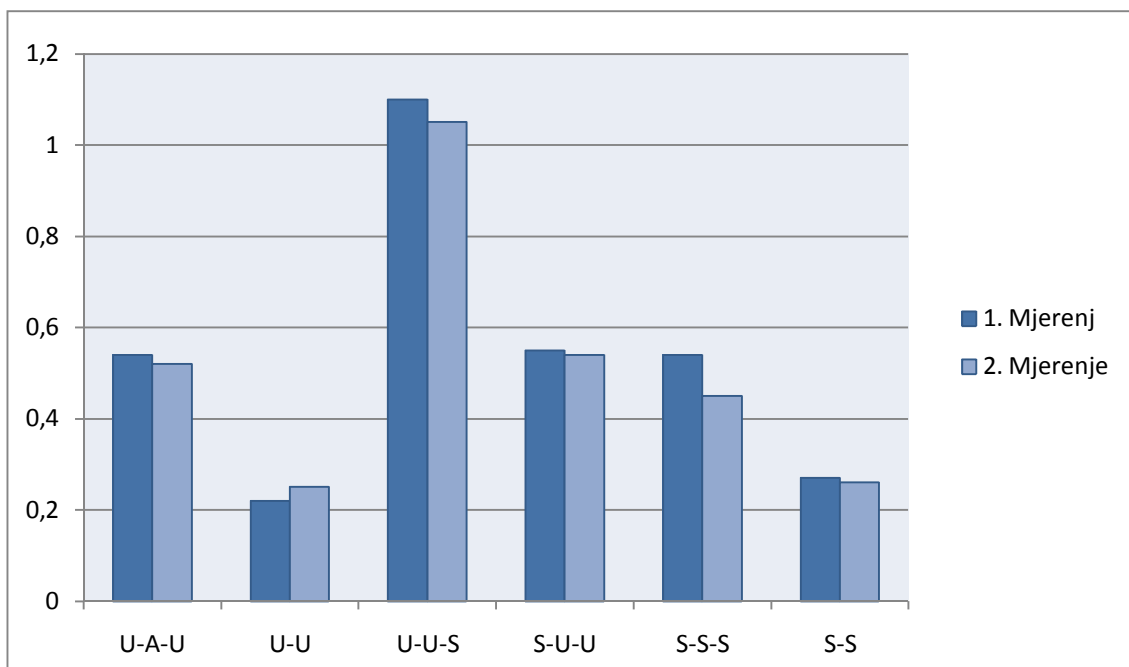
Nakon opterećivanja uzoraka, ostavljamo 24 sata da se epoksidna smola stegne i zadobije krutu formu.

## 9.5. Ispitivanje uzoraka

Ispitivani su različiti laminatni slojevi: tip ugljik-aramid-ugljik, ugljik-ugljik, ugljik-ugljik-staklo, staklo-staklo, staklo-staklo-staklo

Uzorak	Dužina mm	Širina mm	Debljina mm	Lomna žilavost J
U-A-U	25.1	10	1.2	0,57
	25	10.2	1.2	0.52
U-U	25.2	10.1	1	0,22
	24.9	10	1	0,25
U-U-S	25	9.9	1.2	1,1
	25	9.8	1.2	1,05
S-U-U	25.1	10.1	1.2	0,55
	25.2	10.1	1.2	0,54
S-S	25.1	10.3	0.8	0.26
	25.2	10.2	0.8	0,27
S-S-S	25.3	10.1	1.1	0,54
	25.2	10	1.1	0,45

Tablica 8. Lomna žilavost uzoraka



Slika 31 Usporedbe mjerenja uzoraka

## Zaključak

Kompozitni materijali zbog svojih dobrih mehaničkih i fizikalnih svojstava imaju vrlo raširenu primjenu. Konačna svojstva ovise o velikom broju čimbenika pa tako i o vrsti i rasporedu ojačala. Rezultati ispitivanja pokazali su da najveću žilavost ima kompozitni materijal sastavljen od dva sloja ugljičnih vlakana i jednoga sloja staklenih vlakana. Žilavost ovoga kompozita je i do četiri puta veća u odnosu na kompozitni materijal sastavljen samo od slojeva ugljičnih vlakana ili staklenih vlakana.



## Literatura

[1] Miracle D.B., Donaldson S.L., ASM Handbook Volume 21: Composites, ASM International, Ohio, 2001

[2 ] [www.google.com](http://www.google.com)

[3] Filetin T., Kovačićek F., Indof J., Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.

[4] Tablica ISO normi