

# Karakterizacija materijala kompozitnih cijevi

---

Jauk, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:235:872567>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-08**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Filip Jauk**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.

Student:

Filip Jauk

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr.sc. Zdravku Schauperlu na mentorstvu, pomoći i korisnim savjetima koje mi je pružio tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se doc. dr.sc. Zoranu Domitranu na izradi uzoraka te pomoći pri pronalaženju literature i ispitivanjima.

Također se zahvaljujem osoblju u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, Laboratoriju za polimere i kompozite i Laboratoriju za metalografiju na odvojenom vremenu i pomoći pri ispitivanju uzoraka.

Najviše se zahvaljujem svojim roditeljima na pruženoj mogućnosti studiranja, financijskoj pomoći, podršci i motivaciji.

Hvala i mojoj djevojci na pomoći i podršci tokom pisanja ovog rada.

Filip Jauk



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: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Filip Jauk** Mat. br.: 0035216556

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija materijala kompozitnih cijevi**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterisation of composite pipes material**

Opis zadatka:

U današnjoj industriji sve češće se koriste strojni dijelovi od polimernih kompozita. Izuzetak nisu niti cjevovodi gdje sve veću ulogu imaju cijevi izrađene od staklenih vlakana kao ojačala i polimera kao matrice.

U ovom radu potrebno je istražiti specifičnosti primjene polimernih kompozita u izradi različitih vrsta cijevi te prednosti i mane njihove primjene. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi uzorke cijevi od polimernih kompozita koristeći staklena vlakna kao ojačalo i dvije različite vrste polimera kao matrice. Iz tih cijevi treba pripremiti uzorke za ispitivanje mehaničkih svojstava cijevi te provesti ta ispitivanja. Ukoliko je primjenljivo pri tome treba koristiti postupke propisane standardima. Na ispitanim uzorcima potrebno je napraviti analizu mikrostrukture koristeći svjetlosni mikroskop.

Na temelju dobivenih rezultata treba donijeti zaključke vezane uz utjecaj različitih vrsta matrice polimernih kompozita na njihova svojstva i strukturu.

Pri izradi rada potrebno je navesti eventualno dobivenu pomoć i korištenu literaturu.

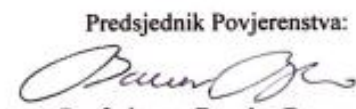
Zadatak zadan:  
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:  
1. rok: 18. veljače 2021.  
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.  
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.  
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.  
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

  
Prof.dr.sc. Zdravko Schauerl

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	1
POPIS SLIKA .....	3
POPIS TABLICA .....	4
POPIS OZNAKA .....	5
SAŽETAK .....	6
SUMMARY .....	7
1. UVOD .....	8
2. POLIMERNI KOMPOZITI .....	9
2.1. Kompozitni materijali ili „kompoziti“ .....	9
2.2. Kompoziti ojačani vlaknima .....	10
2.2.1. Predviđanje svojstava vlaknima ojačanih kompozita .....	12
2.3. Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita .....	14
2.3.1. Omjer „duljina/promjer“ .....	14
2.3.2. Volumni udio vlakana .....	14
2.3.3. Usmjerenost vlakana .....	15
2.3.4. Svojstva matrice .....	15
2.4. Kompoziti s česticama .....	16
2.5. Kompoziti s obzirom na materijal matrice .....	16
2.5.1. Kompoziti s polimernom matricom .....	16
2.5.1.1. Staklenim vlaknima ojačani polimerni kompoziti .....	18
2.5.2. Kompoziti s metalnom matricom .....	19
2.5.3. Kompoziti s keramičkom matricom .....	20
3. POSTUPCI PROIZVODNJE POLIMERNIH KOMPOZITA .....	21
3.1. Načini spajanja matrice i ojačala .....	21
3.1.1. Preprezi .....	21
3.1.1.1. Skrućivanje preprega pri nižim temperaturama .....	23
3.1.2. Smjese za kalupljenje .....	24
3.2. Ručno polaganje .....	24
3.3. Podtlačno oblikovanje .....	25
3.4. Namatanje vlakana .....	26
3.5. Ubризgavanje smole u kalup .....	29
3.6. Infuzija sloja smole .....	30
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	32
4.1.1. Poliesterska matrica .....	32
4.1.2. Vinil esterska matrica .....	33
4.2. Određivanje prividne vlačne čvrstoće obruča [14] .....	33
4.3. Određivanje karakteristika vanjskog opterećenja plastičnih cijevi postupkom paralelnih ploča .....	38
4.4. Određivanje masenog udjela ojačavala .....	42
4.5. Analiza mikrostukture .....	44
4.4. Rasprava .....	50

---

5. ZAKLJUČAK.....	51
PRILOZI.....	54

## POPIS SLIKA

Slika 1.	a) Kompoziti s česticama b) Kompoziti s vlaknima c) Strukturni kompoziti [1] ...	9
Slika 2.	Raspored vlakana u matrici: a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) više smjerno usmjerena vlakna [1].....	11
Slika 3.	Dijagram „naprezanje-istezanje“ vlaknima ojačanog kompozita [1].....	13
Slika 4.	Utjecaj volumnog udjela vlakana na svojstva ojačanog kompozita [6].....	14
Slika 5.	Utjecaj usmjerenja vlakana s obzirom na naprezanje [6] .....	15
Slika 6.	Usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće kompozita s različitim matricama [4].....	15
Slika 7.	Postupak impregniranjem taljevinom [6].....	22
Slika 8.	Izrada kompozita u autoklavu [12].....	22
Slika 9.	Skrućivanje preprega pri nižim temperaturama [12].....	23
Slika 10.	Postupak ručnog polaganja [12] .....	25
Slika 11.	Postupak podtlačnog oblikovanja [12].....	26
Slika 12.	Uzorci namotavanja [13].....	28
Slika 13.	Namatanje ugljičnih vlakana [17] .....	29
Slika 14.	Postupak ubrizgavanja smole u kalup [18] .....	30
Slika 15.	Postupak infuzije sloja smole [18] .....	31
Slika 16.	Uzorci s poliesterskom matricom .....	32
Slika 17.	Uzorci s vinil esterskom matricom.....	33
Slika 18.	Skica alata za ispitivanje vlačne čvrstoće [14] .....	34
Slika 19.	Alat korišten za ispitivanje vlačne čvrstoće.....	34
Slika 20.	Kidalica EU 40mod .....	35
Slika 21.	Uzorci nakon ispitivanja .....	35
Slika 22.	Dijagram prividne čvrstoće uzoraka.....	37
Slika 23.	Prikaz postupka opterećivanja uzorka .....	38
Slika 24.	Dijagram PS za uzorke poliesterske i vinil esterske smole.....	40
Slika 25.	Lončići s uzorcima .....	42
Slika 26.	Dijagram prividne čvrstoće za vinil esterske uzorke sa 70.52% masenog udjela stakla.....	43
Slika 27.	Dijagram prividne čvrstoće za poliesterske uzorke s 74.94% masenog udjela stakla.....	44
Slika 28.	Uređaj PRESI Minitex 233 .....	44
Slika 29.	Uređaj Struers DAP-V .....	45
Slika 30.	Uzorci nakon poliranja i brušenja.....	45
Slika 31.	Mikroskop OLYMPUS GX51 .....	46
Slika 32.	Uzorak P2 mikrostrukura 1 .....	46
Slika 33.	Uzorak P2 mikrostrukura 2.....	47
Slika 34.	Uzorak P2 mikrostrukura 3.....	47
Slika 35.	Uzorak P2 mikrostrukura 4.....	48
Slika 36.	Uzorak V2 mikrostrukura 1 .....	48
Slika 37.	Uzorak V2 mikrostrukura 2 .....	49
Slika 38.	Uzorak V2 mikrostrukura 3 .....	49
Slika 39.	Uzorak V2 mikrostrukura 4 .....	50



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba duromernih materijala matice [9] .....	17
Tablica 2. Mjerenje poprečnog presjeka uzorka .....	36
Tablica 3. Prikaz maksimalne sile za svaki uzorak .....	36
Tablica 4. Rezultati prividne vlačne čvrstoće za svaki uzorak.....	37
Tablica 5. Mjerenje prosječne duljine uzorka .....	39
Tablica 6. Rezultati SN za svaki uzorak .....	40
Tablica 7. Klase krutosti prema ISO 10639 .....	41
Tablica 8. Maseni udio vlakana u poliesterskom kompozitu .....	42
Tablica 9. Maseni udio vlakana u vinil esterskom kompozitu .....	43

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A_m$	$\text{mm}^2$	Površina poprečnog presjeka
$E$	MPa	Modul elastičnosti
$E_c$	MPa	Modul elastičnosti kompozita
$E_m$	MPa	Modul elastičnosti matrice
$E_f$	MPa	Modul elastičnosti vlakna
$F_{\max}$	N	Maksimalna sila
$l$	mm	Duljina uzorka
$l_c$	mm	Kritična duljina
$m$	g	Masa
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	Gustoća
$\rho_c$	$\text{kg/m}^3$	Gustoća kompozita
$\rho_n$	$\text{kg/m}^3$	Gustoća matrice
$\rho_f$	$\text{kg/m}^3$	Gustoća vlakna
SN	$\text{kN/m}^2$	Krutost
$\sigma_a$	$\text{N/mm}^2$	Prividna vlačna čvrstoća
$t$	mm	Debljina stjenke
$V$	$\text{m}^3$	Volumen
$V_f$	$\text{m}^3$	Volumen vlakna
W	%	Maseni udio

## **SAŽETAK**

U ovom radu opisani su materijali iz skupine kompozita s naglaskom na polimerne kompozite ojačane staklenim vlaknima. Visoki iznosi specifične čvrstoće te specifične krutosti čine te materijale kao dobre kandidate za zamjenu konvencionalnih materijala, tako i pri konstrukciji cjevovoda. U teorijskom dijelu opisani su kompoziti s naglaskom na polimerne kompozite i postupci proizvodnje istih. U eksperimentalnom dijelu provedena su ispitivanja prividne vlačne čvrstoće i krutost kompozitnih cijevi, određivanje masenog udjela ojačala i analiza strukture. Ispitni uzorci su imali ista ojačavala (staklena vlakna), a razlikovali su se u materijalu matrice (poliesterska matrica i vinil-esterska matrica).

Ključne riječi: kompozit, polimerni kompozit, cijevi, vlačna čvrstoća, krutost, maseni udio ojačala

## **SUMMARY**

This paper describes materials from the group of composites with an emphasis on glass-reinforced polymer compositions. High amounts of specific strength and specific stiffness make the materials as good candidates for conventional material replacement, as well as in the construction of pipelines. The theoretical part describes composites with emphasis on polymer compositions and processes for their production. In the experimental part, tests of tensile strength, pipe stiffness, determination of mass fraction of glass fibres and structure analysis were performed. The test samples had the same reinforcements (glass fibers) and differed in matrix material (polyester resin and vinyl ester resin).

Keywords: composite, polymer composite, pipes, tensile strength, stiffness, mass fraction of glass fibres

## 1. UVOD

Upotreba kompozita počela je još 1950-ih. Već tada su bile jasne prednosti kompozita nad konvencionalnim materijalima. Mala masa, niske investicije u proizvodnju, sniženje troškova ujedinenja dijelova, zadovoljavajuća mehanička svojstva te antikorozivnost privukli su pažnju industrije i prevagnuli su nad nedostacima kao što su visoka cijena početnih komponenti i teškoće pri velikoserijskoj proizvodnji.

Jedna grana industrije koja je to primjetila je i cjevarstvo. U cjevarstvu najčešće se koriste poliesterske cijevi ojačane staklenim vlaknima za transport pitke i sanitarne vode, kišnice, fekalne, morske i otpadne vode.

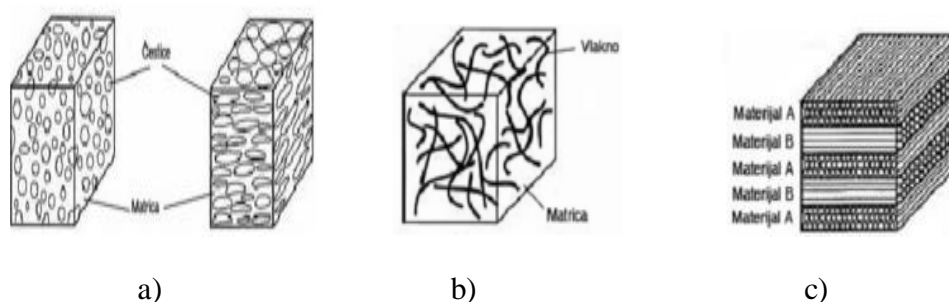
Takve cijevi su se počele koristiti iz raznih razloga. Materijal je otporan na koroziju te ima dug i učinkoviti radni vijek. Nema potrebe za oblaganjem, premazima, katodnu zaštitu ili drugih oblika zaštite od korozije. Troškovi održavanja su niski. Cijevi su lagane, troškovi prijevoza su niski i nema potrebe za skupom opremom za rukovanje cijevima. Cijevna stjenka je glatka, gubici uslijed trenja su niski te se talog minimalno nakuplja što smanjuje troškove čišćenja.

U ovom radu su opisani kompoziti, postupci proizvodnje, ispitivanja prema sukladnim normama i analiza mehaničkih svojstava.

## 2. POLIMERNI KOMPOZITI

### 2.1. Kompozitni materijali ili „kompoziti“

Kompozitni materijali ili kompoziti su heterogeni materijali koji se sastoje od više materijala s ciljem oblikovanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponentna sama za sebe. Heterogene su strukture i imaju jasnu granicu između komponenti. Najčešće jedna faza (matrica) je kontinuirana i okružuje ostale disperzirane faze. Kompoziti se dijele na: kompozite ojačane česticama, vlaknima ojačani kompoziti, slojeviti kompoziti i sendvič konstrukcije (slika 1) [1].



Slika 1. a) Kompoziti s česticama b) Kompoziti s vlaknima c) Strukturni kompoziti [1]

Kompoziti s vlaknima (vlaknima ojačani kompoziti) imaju najveću efikasnost ojačanja. Opterećenje kod ovih kompozita prenosi se i distribuira među vlaknima putem matrice koja je u većini slučajeva osrednje duktilna. Zbog toga je vrlo važna veza između matrice i vlakana. Ukoliko se za kompozit koriste diskontinuirana vlakna, efikasnost ojačala ovisi o njihovoj duljini. Za svaku kombinaciju vlakno-matrica, postoji tzv. kritična duljina, dok duljine kontinuiranih vlakana uvelike prelaze tu kritičnu vrijednost [3].

Mehanička svojstva kompozita ojačanog kontinuiranim usmjerenim vlaknima su vrlo anizotropna. U smjeru vlakana čvrstoća kompozita je maksimalna, dok je u smjeru okomitom na vlakna minimalna. Kod kompozita ojačanih kratkim vlaknima, vlakna mogu biti usmjerena ili slučajno raspoređena. Kod takvih kompozita značajne vrijednosti čvrstoće i krutosti moguće je postići u uzdužnom smjeru. Bez obzira na ograničenja na efikasnost ojačala, kod kompozita ojačanih slučajnim usmjerenim kratkim vlaknima svojstva su izotropna [3].

Kompoziti prema vrsti matrice dijele se na polimerne, metalne i keramičke kompozite. Najčešće se koristi polimerna matrica, koja može biti ojačana staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima. Kod metalnih kompozita kao ojačala koriste se viskeri i razni tipovi vlakana jer su radne temperature mnogo više. Svojstvo mnogih polimernih i metalnih kompozita su visoki omjer čvrstoće i gustoće (specifična čvrstoća) i visoki omjer modula elastičnosti i gustoće (specifična krutost). Da bismo postigli tako visoke iznose specifične čvrstoće i krutosti koriste se matrice niske gustoće. Kod keramičkih kompozita razvoj je usmjeren na povećanje lomne žilavosti (otpornost materijala krhkom lomu u prisutstvu pukotine ili neke druge pogreške koja djeluje kao koncentrator naprezanja). Sljedeća skupina suvremenih kompozita su „ugljik-ugljik“ kompoziti. To je vrsta kompozita koja se izrađuje ulaganjem ugljičnih vlakana u piroliziranu ugljičnu matricu. Također, značajni su i hibridni kompoziti koji se ojačavaju s barem dva različita tipa vlakana, a može i više [4].

Prepreg je vlaknom ojačan materijal koji je impregniran različitim smolama te se dobavlja u obliku tkanine. Najčešće se zamrzava kako bi se mogao skladištiti dulje vrijeme.

Matrica u prepregu nije potpuno polimerizirala pa je na dodir ljepljiva. Preprezi se zatim stavljaju u kalup, vakuumski pakiraju i zagrijavaju na temperaturu 120 °C do 180 °C (uz kemijske dodatke je moguće sniziti temperaturu na 60 °C do 100 °C).[1] Osim slojeva mogu se proizvoditi i šuplji elementi (proizvodi, poluproizvodi) i to postupkom namotavanja vlakana. Taj postupak se temelji na tome da se smolom natopljena vlakna ili prepreg namotavaju oko jezgre koja rotira. Paralelno s tim može se odvijati umrežavanje matrice (smole), no konačno umrežavanje često se provodi naknadnim ugrijavanjem.

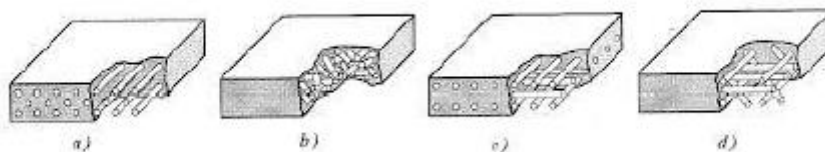
## 2.2. Kompoziti ojačani vlaknima

Ugradnjom čvrstih, krutih i krkih vlakana u mekaniju, duktilniju matricu povisuje se čvrstoća, žilavost, krutost te povećava omjer „čvrstoća/gustoća“. Materijal matrice prenosi opterećenje na vlakna što osigurava duktilnost i žilavost jer vlakna nose veći dio opterećenja. Efikasnost ojačanja najveća je kod kompozita s vlaknima, ali samo ako je veza vlakno-matrica jaka. U uporabi su raznoliki materijali ojačala. Stoljećima se za ojačanje glinenih opeka rabila slama. Za ojačanje betonskih konstrukcija koristi se čelična armatura.

Vlaknasta ojačala se prema promjeru dijele u tri skupine: viskeri, vlakna i žice.

Viskeri su vrlo tanke niti keramičkih monokristala visoke čistoće koji imaju ekstremno velik omjer „duljina/promjer“. Izrazito su pravilne građe i smatraju se najčvršćim poznatim materijalom. Viskeri mogu biti izrađeni od grafita, silicij-grafita, silicij-nitrida i aluminij-oksida. Loša strana viskera je visoka cijena i teže ugrađivanje u matricu [1].

Vlakna mogu biti polikristalne ili amorfne sktrukture. Imaju dobra mehanička svojstva što je rezultat snažnih međuatomskih sila koje vladaju u materijalima niskog atomskog broja i male gustoće, npr. C, B, Al, Si. Vlakna mogu biti napravljena samo od tih elemenata te njihovih međusobnih spojeva ili pak njihovih spojeva s kisikom i dušikom (aramid, staklo, ugljik, bor, aluminij-oksid i silicij-karbid) [5]. Razlikuju se prema vrsti, duljini, promjeru, orijentaciji i hibridizaciji. Na mehanička svojstva bitno utječe raspored vlakana koji može biti različit (slika 3).



**Slika 2. Raspored vlakana u matrici: a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) više smjerno usmjerena vlakna [1]**

Ako su kontinuirana vlakna u kompozitu postavljena jednosmjerno to uzrokuje anizotropnost mehaničkih svojstava. Međutim, jednosmjerno postavljanje vlakana koristi se kod izrade elemenata ako je taj element opterećen u smjeru orijentacije tih vlakana. U tom slučaju postiže se maksimalne vrijednosti čvrstoće i krutosti. Kod slučajno usmjerenih, diskontinuiranih vlakana, krajevi vlakna nose manje opterećenja nego srednji dio i zbog toga je predviđanje mehaničkih svojstava teže. Kod kratkih vlakana dobivamo izotropnost mehaničkih svojstava, ali postoje ograničenja u efikasnosti ojačavanja [6].



### 2.2.1. Predviđanje svojstava vlaknima ojačanih kompozita

Gustoća vlaknima ojačanih kompozita može se odrediti zakonom miješanja. Određivanje mehaničkih svojstava polimernih i kompozitnih materijala dosta je složenije od određivanja tih istih svojstava na metalnim materijalima s izotropnim svojstvima. Mehanička svojstva se određuju eksperimentalno, a „zakon miješanja“ je najčešća metoda.

Kako bi ova metoda bila relevantna, moraju vrijediti neke osnovne pretpostavke. Veza između matrice i ojačala mora biti idealna, ne smije biti šupljina u kompozitu niti lokalne koncentracije naprezanja, tj. ne razmatraju se lokalni efekti [5].

Zakon miješanja koji predviđa gustoću kompozita glasi:

$$\rho_c = V_m \rho_m + V_f \rho_f \quad (1)$$

Gdje je:

$\rho_c$  – gustoća kompozita, g/cm<sup>3</sup>,

$V_m$  – volumen matrice, cm<sup>3</sup>,

$\rho_m$  – gustoća matrice, g/cm<sup>3</sup>,

$V_f$  – volumen vlakna, cm<sup>3</sup>,

$\rho_f$  – gustoća vlakna, g/cm<sup>3</sup> [6].

Modul elastičnosti za kompozitne dijelove kod kojih opterećenje djeluje paralelno s kontinuiranim jednosmjernim vlaknima određuje se prema jednadžbi:

$$E_c = V_m E_m + V_f E_f \quad (2)$$

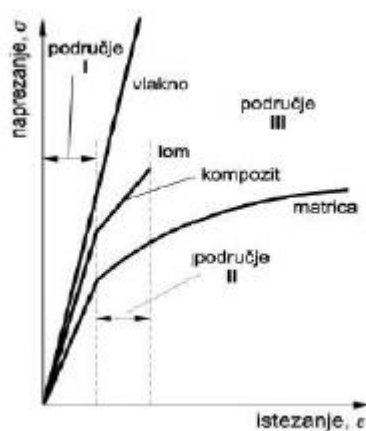
Gdje je:

$E_c$  – modul elastičnosti kompozita, MPa ,

$E_m$  – modul elastičnosti matrice, MPa ,

$E_f$  – modul elastičnosti vlakna, MPa.

Pri povišenim naprežanjima dolazi do deformiranja matrice, te veza između naprežanja i istežanja više nije linearna što se vidi na slici 3 [3].



Slika 3. Dijagram „naprežanje-istežanje“ vlaknima ojačanog kompozita [1]

U slučaju kad opterećenje djeluje okomito na smjer vlakana, komponente djeluju neovisno jedna o drugoj. Modul elastičnosti može se izračunati prema jednadžbi (3)

$$1/E_c = V_m/E_m + V_f/E_f \quad (3)$$

Čvrstoća kompozita ovisi o vezi između matrice i vlakana, te je ograničena deformiranjem matrice zbog lošijih mehaničkih svojstava u odnosu na vlakna. Posljedica toga je da je utvrđena čvrstoća uvijek manja od predviđene zakonom miješanja. Druga mehanička svojstva, npr. žilavost, umor materijala, puzanje materijala te duktilnost, predviđaju se teže nego vlačna čvrstoća.

Svojstva se teže predviđaju ako su vlakna diskontinuirana. To je događa zbog toga što krajevi vlakna nose manje opterećenja nego srednji dio vlakna. Zbog toga čvrstoća dobivena

ispitivanjem je manja od one izračunate zakonom miješanja. Odstupanje je manje ako je stvarna duljina vlakna „ $l$ “ veća od kritične duljine „ $l_c$ “, odnosno preciznije ako je odnos „duljina/promjer“ vlakna „ $l/d$ “ veći od kritičnog. Ovaj omjer bitno utječe na svojstva kompozita. Na primjer, poliamid ojačan ugljičnim vlaknima iznosa  $l/d=30$  ima čvrstoću  $110 \text{ N/mm}^2$ , a vlaknima veće duljine ( $l/d=800$ ) postiže se čvrstoća od  $240 \text{ N/mm}^2$ [7].

Najveći iznos modula elastičnosti imaju materijali s kovalentnom vezom i niskim atomskim brojem, npr. bor i grafit. Ovi elementi također imaju visoke iznose čvrstoće i visoko talište, ali su previše krhki i reaktivni da bi se koristili zasebno u kompozitnim materijalima.

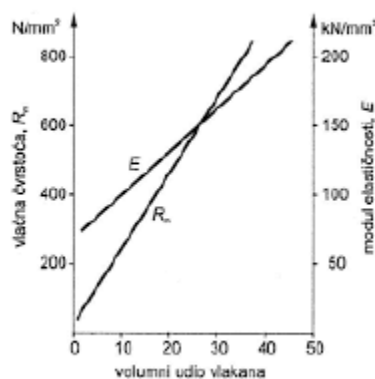
### 2.3. Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita

#### 2.3.1. Omjer „duljina/promjer“

Dugačka, kontinuirana vlakna koja daju najbolja svojstva teško se proizvode te se teško ugrađuju u matricu. Diskontinuirana vlakna s velikim omjerom „duljina/promjer“ lakše se ugrađuju u matricu, a tako dobivamo izotropna svojstva kompozita što znači veću krutost i čvrstoću [6].

#### 2.3.2. Volumni udio vlakana

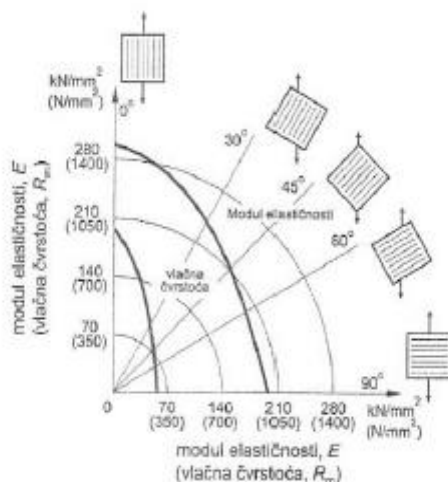
Većim volumnim udjelom vlakana povisuje se čvrstoća i krutost kompozita (slika 5). Dijagram utjecaja volumnog udjela vlakana na vlačnu čvrstoću prikazan je na slici 5 [6].



Slika 4. Utjecaj volumnog udjela vlakana na svojstva ojačanog kompozita [6]

### 2.3.3. Usmjerenost vlakana

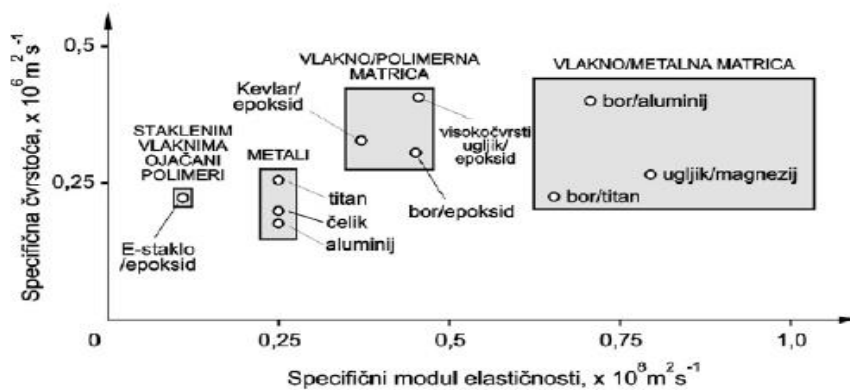
Najveći iznosi krutosti i čvrstoće postignuti su kada opterećenje djeluje u istom smjeru kao vlakna (slika 5). Vlakna se još mogu polagati ortogonalno ili pod nekih drugim kutom čime se dobivaju anizotropna svojstva kompozita. Time smanjujemo maksimalnu čvrstoću, ali dobivamo kompozit jednoličnijih svojstava.



Slika 5. Utjecaj usmjerenja vlakana s obzirom na naprezanje [6]

### 2.3.4. Svojstva matrice

Matrica također treba imati dobra mehanička svojstva, zato jer i ona pridonosi ukupnoj čvrstoći kompozita. Na prikladnost matrice utječe temperatura tališta. Polimeri su primjenjivi do maksimalne temperature od 80 °C za nezasićene poliesterske smole, pa do 315 °C za poliamide. Metalne matrice možemo koristiti pri većim temperaturama. Na slici 6. prikazan je odnos između materijala matrice i specifičnog modula elastičnosti.



Slika 6. Usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće kompozita s različitim matricama [4]

## 2.4. Kompoziti s česticama

Kompoziti s česticama strukturom slične na dvofazne disperzijski ojačane metalne legure. U mekanoj i duktilnoj matrici nalaze se jednoliko raspoređene, tvrde i krhke čestice u odnosu na matricu. Za razliku od metalnih legura, za ugradnju čestica ne primjenjuje se transformacija faza. Prema veličini čestica i načinu na koji one utječu na svojstva, kompoziti s česticama dijele se na: kompozite s velikim česticama i kompozite s disperzijom [1].

Male čestice disperzirane su u matrici, a dimenzije su im od 10 nm do 250 nm. One svojom prisutnošću ometaju gibanje dislokacija matrice, što rezultira ojačanjem kompozita. Kompoziti s dodanim malim česticama se zato nazivaju kompoziti s disperzijom. Da bi čestice učinkovito ometale gibanje dislokacija one moraju biti tvrde (oksidi metala), a učinak ojačanja još ovisi i o oblicima, količinama i raspodjeli disperziranih čestica. Disperzirane čestice ne smiju se otapati niti kemijski reagirati s matricom. S druge strane one moraju biti čvrsto povezane s materijalom matrice. [8] Kako bi se efekt postigao potrebno je do 15% disperziranog materijala.

Kompoziti s velikim česticama proizvode se s ciljem postizanja takvih kombinacija svojstava kojima primarna zadaća nije osiguranje čvrstoće. Velikim česticama promjer je veći od 1  $\mu\text{m}$  te ne sudjeluju direktno u gibanja dislokacija.

## 2.5. Kompoziti s obzirom na materijal matrice

### 2.5.1. Kompoziti s polimernom matricom

Komponente kompozita s polimernom matricom su polimer kao matrica i vlakna ili čestice kao komponenta za ojačavanje. Uporaba ovih kompozita ima najveću raznolikost s obzirom na količinu, svojstva pri sobnoj temperaturi, lakoću proizvodnje i cijenu.

Duromeri koji se koriste kao materijali matrice su:

- Poliesterske smole
- Viniesterske smole
- Epoksidne smole
- Fenolne smole.

Najkorištenije i najjeftinije polimerne smole su polisteri i vinil esteri. Ti se materijali

prvenstveno koriste kod staklenim vlaknima ojačanih kompozita. Epoksidne smole su skuplje te su često neprikladne za komercijalnu upotrebu [6]. Usporedba duromernih materijala matrice prikazana je u tablici 1.

**Tablica 1. Usporedba duromernih materijala matice [9]**

POLIMER	PREDNOSTI	NEDOSTACI
Polyester	Lako se primjenjuje	Osrednje mehaničke osobine
	Najjeftinija od svih polimera (1.5-3 \$ /kg)	Visoka emisija stirena kod otvorenih kalupa
		Veliko utezanje pri otvrdnjavanju
		Ograničeni raspon vremena rada
Vinylester	Vrlo visoka kemijska otpornost (u odnosu na okoliš)	Za postizanje boljih svojstava potreban je naknadni tretman
	Bolje mehaničke osobine od polyestera	Visoki sadržak stirena
		Skuplje od polyestera (3 – 6 €/kg)
Epoxy	Visoke mehaničke osobine	Skuplje od vinylestera (5 – 24 €/kg)
	Visoka vodootpornost	Osjetljiv na nepotpuno miješanje komponenata
	Mogućnost dugog vremena rada	Agresivnost kod rukovanja
	Otpornost na visoke temperature do 140 °C mokro / 220 °C suho	
	Malo utezanje pri otvrdnjavanju	

S obzirom na materijal vlakana kao ojačala polimerne kompozite možemo podijeliti na:

- Kompozite ojačane staklenim vlaknima
- Kompozite ojačane ugljičnim vlaknima
- Kompozite ojačane aramidnim vlaknima
- Kompozite ojačani ostalim materijalima za ojačanje

#### 2.5.1.1. *Staklenim vlaknima ojačani polimerni kompoziti*

Polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima proizvode se u najvećoj količini, a primjeri primjene su široki: kućišta vozila, trupovi plovila, cijevi, spremnici itd., te vrlo dobro zamjenjuju klasične konstrukcijske materijale. Polimerni kompozit ojačan staklenim vlaknima sastoji se od kontinuiranih ili diskontinuiranih staklenih vlakana koji služe kao ojačalo, a nalaze se u polimernoj matrici.

Staklo se koristi kao ojačalo iz više razloga:

- Lako ga se dobiva iz rastaljenog stakla u obliku visokočvrstih vlakana
- Lako ga se dobavlja te postoje razne tehnike proizvodnje kompozita ojačanim staklenim vlaknima
- Vlakna su relativno čvrsta, dobiva se kompozit vrlo visoke specifične čvrstoće
- Kombinacijom s različitim polimerima postiže se kemijska otpornost što daje kompozite korisne za primjenu u različitim korozivnim sredinama [6].

Staklena vlakna možemo podijeliti u više kategorija od kojih su za inženjersku primjenu najvažnija vlakna opće primjene i niže cijene te vlakna za specijalne. Više od 90 % vlakana je za opću primjenu i to su E-stakla približnog sastava: 54 % SiO<sub>2</sub>, 14 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 22 % (CaO+MgO), 10 % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. S- staklo je drugačijeg sastava i boljih mehaničkih svojstava.

Oznake staklenih vlakana prema sastavu i svojstvima:

- E – niska električna provodljivost,
- C – kemijska postojanost,
- S – visoka čvrstoća,
- M – vsoki modul rastezljivosti,
- A – alkalijsko staklo [1].

Postoji nekoliko problema s ovom skupinom materijala. Unatoč dobrim mehaničkim svojstvima (visoka čvrstoća) vlakna nisu dovoljno kruta te ne mogu pružiti krutost koja je potrebna za neke primjene (npr. zrakoplovi, mostovi). Polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima najčešće se primjenjuju do temperature od 200 °C, jer pri višim temperaturama oni počinju teći i gube mehanička svojstva. Korištenjem poliimidne smole kao matrice i visokočvrstog rastaljenog silicijevog dioksida kao ojačala temperatura primjene može se povisiti do 300 °C [6].

#### 2.5.2. Kompoziti s metalnom matricom

Premda polimeri prevladavaju kao materijal matrice u kompozitu, često se za materijal matrice koriste i metali (MMC- e. Metal Matrix Compisites). Kod takvih kompozita matica je metalna (duktilna). Kompoziti s metalnom matricom posjeduju iznimno dobra mehanička svojstva. Dodavanjem ojačala u obliku čestica, kontinuiranih i diskontinuiranih vlakana, poboljšavaju se svojstva matrice, postižu se veći iznosi specifične čvrstoće i specifične krutosti, te otpornost puzanju. Metalni kompoziti mogu se koristiti pri temperaturama puno višim nego polimerni kompoziti (temperature veće od 700 °C), ali imaju visoku cijenu proizvodnje te kompliciranije postupke izrade u usporebi s polimernim kompozitima [5].

Kao materijali matrice mogu se koristiti razni metali poput titanovih legura, superlegure na bazi nikla i kobalta, te lake magnezijeve i aluminijske legure posebno prikladne u zrakoplovstvu.

Glavni problem pri proizvodnji kompozita s metalnom matricom je kemijska nekompatibilnost metalne matrice i vlakna zbog događanja kemijske reakcije između njih, što sužava broj kombinacija matrica i vlakana koje se mogu kombinirati. Najčešće se za ojačavanje metalnih matrica koriste silicijev karbid (SiC), aluminijev oksid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), aluminij (Al), bor (B) te Borsic (borovo vlakno presvučeno silicijevim karbidom). Ugljična vlakna se obično koriste u matricama od aluminijske i magnezijeve, ako temperature primjene nisu previsoke.



Postupak prerade metalnih kompozita sastoji se od najmanje dva koraka. Prvi korak je sjedinjenje (ulaganje ojačala u matricu), a drugi je oblikovanje. Za tu svrhu razvijene su mnoge metode, dok se kod metalnih kompozita ojačanim diskontinuiranim vlaknima koriste postupci kao što su kovanje, valjanje i ekstrudiranje [3].

### 2.5.3. Kompoziti s keramičkom matricom

Kompoziti s keramičkom matricom sastoje se od keramičke matrice te ojačala u obliku čestica ili viskera. Keramika je materijal otporan puzanju koji posjeduje mehaničku otpornost pri visokim temperaturama, te iznimnu korozivsku postojanost. Također je mala gustoće, te visoke tvrdoće. Nedostatak keramike je sklonost krhkom lomu (niska lomna žilavost u usporedbi s metalima), ali to se pokušava ispraviti razvojem suvremenih keramičkih kompozita.

Keramičke matrice možemo podijeliti u dvije osnovne skupine: oksidnu i neoksidnu keramiku. U oksidnu keramiku spadaju  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , mulit ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ), Ba-, Li- i Ca-aluminosilikati (oksidna keramika ima bolju toplinsku i kemijsku stabilnost). Neoksidna keramika ima nešto bolja mehanička svojstva i u nju spadaju: SiC,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , BC, AlN, itd.

I ojačanja možemo podijeliti u dvije skupine. Prva skupina su diskontinuirana pojačanja. U diskontinuirana pojačanja spadaju čestice, viskeri, sječeni komadići vlakana, itd. Za ojačanje koriste se čestice cirkonijeva oksida ( $\text{ZrO}_2$ ) ili aluminijska oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), te silicijev karbid (SiC) i silicijev nitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) u slučaju viskera.

Kompoziti s keramičkom matricom proizvode se postupcima vrućeg prešanja (HP), vrućeg izostatičkog prešanja (HIIP) i sinteriranja. Keramički kompoziti koriste se za mehanički i tribološki opterećene dijelove pri visokim temperaturama ( $>1600\text{ }^\circ\text{C}$ ) kao što su npr. pojedini dijelovi motora.

### **3. POSTUPCI PROIZVODNJE POLIMERNIH KOMPOZITA**

#### **3.1. Načini spajanja matrice i ojačala**

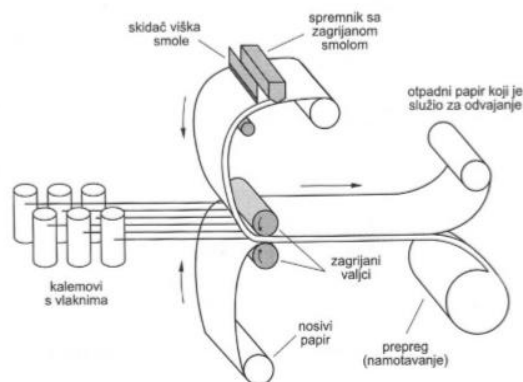
Spajanje vlakana i polimerne matrice događa se tijekom proces oblikovanja ili prije procesa oblikovanja. Kada se to događa tijekom procesa oblikovanja, početni materijali dođu u radno mjesto u obliku odvojenih komponenti te se tada spajaju za vrijeme procesa oblikovanja (postupci namotavanja vlakana i pultrudiranje). U slučaju spajanja matrice i vlakana prije oblikovanja materijali su oblikovani u preliminarni oblik pogodan za primjenu u oblikovanju. Dva su načina izrade preliminarnih oblika, a to su: preprezi i smjese za kalupljenje [11].

##### *3.1.1. Preprezi*

Preprezi su oblici kompozita koji se sastoje od kontinuiranih jednosmjernih ili tkanih vlakana prethodno prevučenih kontroliranim iznosom neočvrsnute smole kao matrice. Dolaze u obliku rola ili ploča, te su odmah spremni za upotrebu u radionici gdje se izrađuje kompozit. Najkorišteniji su u zrakoplovnoj industriji i drugim industrijama gdje su potrebni materijali dobrih mehaničkih svojstava.

U prepezima može se koristiti bilo koja kombinacija vlakana i matrice, ali najkorištenija vlakna su aramidna, ugljična i staklena. Najkorištenije matrice su epoksidne, fenolne ili poliimidne smole.

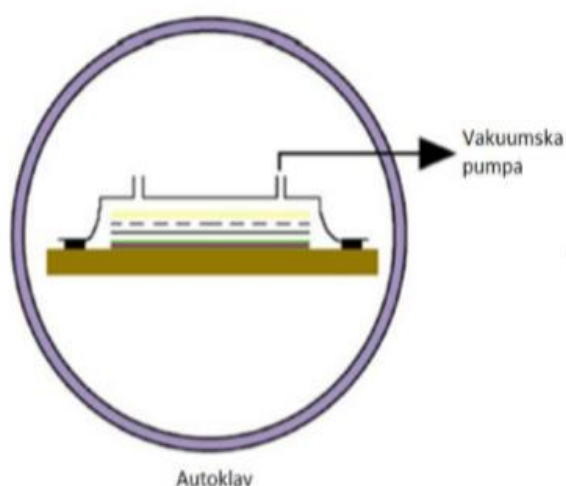
Postupci izrade preprega zasnivaju se na impregniranju taljevinom ili impregniranjem otopinom. Kod impregniranja taljevinom matrica je impregnirana na vlakna koristeći visoku temperaturu i tlak. Postupkom impregniranja otopinom, vlakna prolaze kroz smolnu otopinu, a zatim prolaze kroz kalendar. Poslije toga prolaze kroz peć kako bi se uklonilo otapalo [11]. Postupak impregniranja taljevinom prikazan je na slici 7.



**Slika 7. Postupak impregniranjem taljevinom [6]**

Oblici dobiveni na takav način najčešće se izlažu niskim temperaturama kako bi se mogli skladištiti dulje vrijeme. Nakon što se svaki sloj tkanine natopi smolom, preprezi se polažu u kalup, vakuumski pakiraju i zagrijavaju pri 120 °C -180 °C. Za postizanje boljih mehaničkih svojstava je potreban veći tlak (do 5 bara), te ih je potrebno staviti u autoklav.

Autoklav je naprava za zagrijavanje materijala u kojoj se vrši završna faza postupka izrade (umreživanje, stvaranje) kompozita. U autoklavu nalaze se plinovi kao što su: dušik, ugljični dioksid ili njihova mješavina sa zrakom pod tlakom. Griju se pomoću plinskih plamenika ili električnih grijala do temperature 700 °C [12]. Izrada kompozita u autoklavu prikazana je na slici 8.



**Slika 8. Izrada kompozita u autoklavu [12]**

Prednosti izrade kompozita u autoklavu [12]:

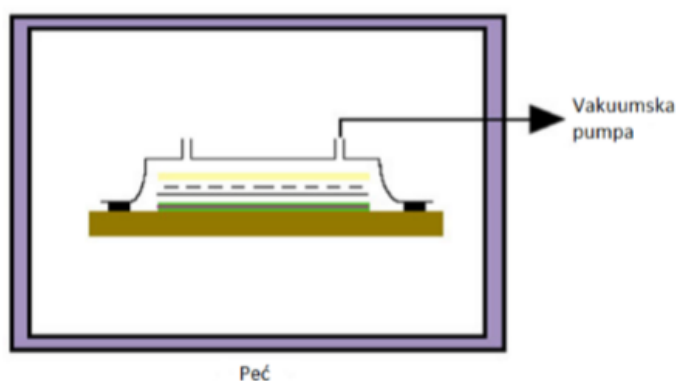
- vrlo precizno se može podešavati udio vlakana i smole,
- materijali su potpuno ekološki prihvatljivi,
- moguće je i impregniranje i matrica viskoznosti čime se znatno utječe na mehanička i toplinska svojstva kompozita,
- moguća je automatizacija cijelog procesa.

Nedostaci izrade kompozita u autoklavu [12]:

- veći troškovi materijala,
- autoklavi su prilično skupi i ograničenih dimenzija,
- proces se odvija pri povišenim temperaturama (to treba uzeti u obzir pri izboru alata)

### 3.1.1.1. Skrućivanje preprega pri nižim temperaturama

Kako bi se prepreg mogao skrućivati pri nižim temperaturama potrebni su kemijski dodaci koji omogućuju skrućivanje na temperaturama od 60 °C - 100 °C. Tada je moguća primjena vakuumnog postupka bez autoklava. Matrice su uglavnom epoksidne smole, dok se kao ojačalo koriste sve vrste preprega [12]. Skrućivanje preprega pri nižim temperatura pokazano je na slici 9.



Slika 9. Skrućivanje preprega pri nižim temperaturama [12]

Prednosti skrućivanja preprega pri nižim temperaturama [12]:

- mogu se koristiti i jeftiniji alati za izradu alata (npr. drvo) jer su temperature skrućivanja niže,
- zbog jednostavnosti opreme mogu se izrađivati dijelovi većih dimenzija,
- manji utrošak energije zbog nižih temperatura.

Nedostaci skrućivanja preprega pri nižim temperaturama [12]:

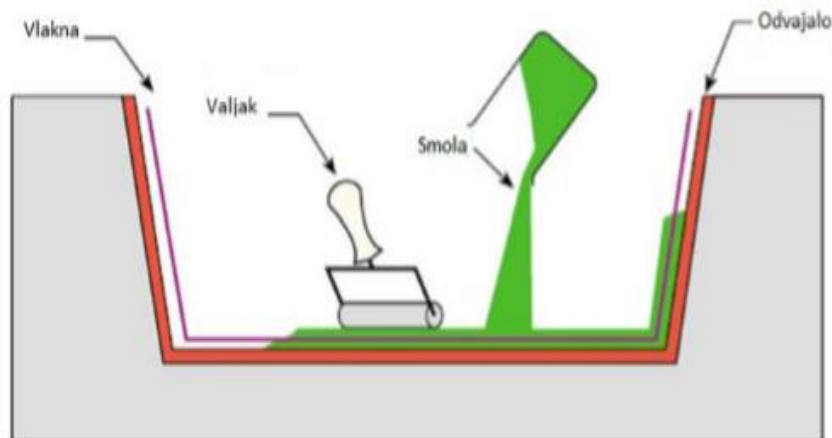
- veća cijena materijala,
- potrebna oprema (peć i vakuumsko pakiranje),
- alat mora izdržati temperature od 60 °C-100 °C.

### 3.1.2. Smjese za kalupljenje

Smjese za kalupljenje su slične onim koje se koriste u kalupljenju polimera. Sastoje se od polimera, punila i drugih dodataka poput ojačavala i pigmenta. Dizajnirani su za upotrebu u kalupljenju i moraju posjedovati svojstvo tečenja, barem do nekog stupnja. Smjese za kalupljenje najčešće su duromerne. One dolaze u neumreženom stanju, a umrežavanje se događa tijekom ili nakon procesa oblikovanja. Smjese se sastoje od matrice s kratkim, slučajno raspoređenim vlaknima. Koriste se u postupcima poput injekcijskog prešanja ili izravnog prešanja. Pojavljuju se u nekoliko oblika: pločasti osmoljeni matovi, vlaknasti preprezi i debolopločasti osmoljeni matovi [11].

## 3.2. Ručno polaganje

U postupku ručnog polaganja prvo se vlakna povezana u tkanja stavljaju u kalup. Na njih se tada nanosi matrica koja se impregnira u ojačala pomoću valjaka ili kistova. Do umrežavanja dolazi pri atmosferskim uvjetima. Za matrice se koriste različiti materijali: poliesteri, vinil esteri, epoksidne smole, fenoli itd. Za ojačanja se koriste svi tipovi vlakana, a iznimka su aramidna vlakna koje je teže natopiti ručno [12]. Ručno polaganje pokazano je na slici 10.



**Slika 10. Postupak ručnog polaganja [12]**

Prenosi ručnog polaganja [12]:

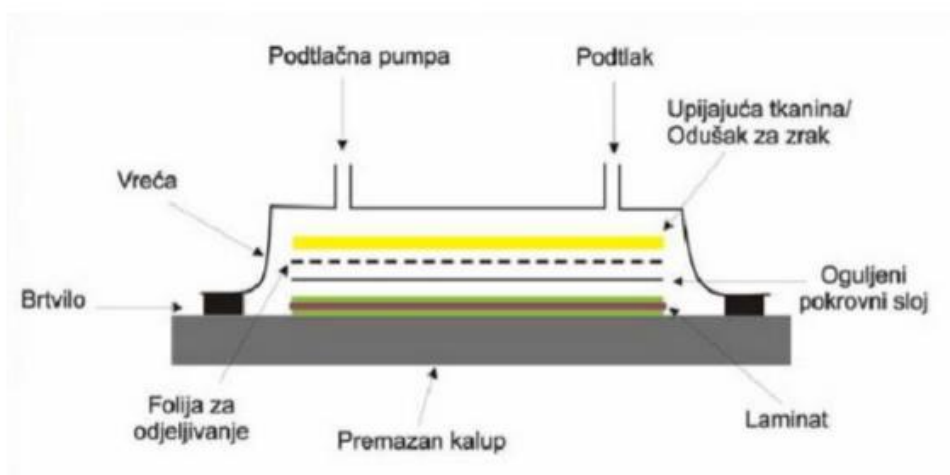
- postupak je vrlo jednostavan,
- mali troškovi izrade alata,
- veliki izbor materijala i dobavljača,
- udio vlakana je veći i vlakna su dulja nego u slučaju polaganja naštrcavanjem.

Nedostaci ručnog polaganja [12]:

- kvaliteta postupka ovisi o vještini radnika,
- teško je proizvesti kompozit s malim udjelom smole bez pukotina,
- smole imaju manju molekularnu masu, što znači da mogu biti štetnije od proizvoda s većom molekularnom masom,
- problem je uklanjanje stirena nastalog iz poliestra i vinil estera, moraju se koristiti smole male viskoznosti što znatno utječe na svojstva.

### **3.3. Podtlačno oblikovanje**

U ovom postupku prvo se ručno sve komponente poslože u kalup te se na njih stavi polimerni pokrov. S vakuumskom pumpom uklanja se zrak i podtlak što omogućuje bolje spajanje komponenti kompozita. Matrijali matrice mogu biti fenolne i epoksidne smole, zato što kod poliestra i vinil estera dolazi do povećanje ekstrakcije stirena. Mogu se koristiti sve vrste vlakana [12]. Postupak podtlačnog oblikovanja nalazi se na slici 11.



**Slika 11. Postupak podtlačnog oblikovanja [12]**

Prednosti podtlačnog oblikovanja[12]:

- mogu se proizvoditi kompoziti s većim udjelom vlakana,
- manji udio pukotina u materijalu,
- zbog povišenog tlaka bolje je vlaženje vlakana i protok smole,
- vakuum smanjuje količinu ishlapljenih tvari.

Nedostaci podtlačnog oblikovanja [12]:

- proces je skuplji i zahtjeva veću vještinu radnika.

### 3.4. Namatanje vlakana

Namatanje vlakana relativno je jednostavan proces u kojima kontinuirana vlakna namotavaju na rotirajuću jezgru, te se zatim umrežavaju i kreiraju šuplje oblike. Namatanje vlakana ostvareno je pomoću specijalno konstruiranih strojeva. Strojevi koji mogu imati i šest osi (čak i 7 uz dodatak robotskih poboljšanja), omogućavaju operatoru kontrolu mnogih parametara, uključujući brzinu namatanja, kut namatanja, položaj vlakana, temperaturu smole i napetost vlakana. Vlakna se namotavaju oko jezgre u ponavljajućim uzorcima, u više slojeva. Proces se ponavlja dok se ne dostigne zahtjevani broj slojeva [12].

Staklena, ugljikova i aramidna vlakna najčešće se koriste u ovom procesu. Najkorištenija su staklena vlakna (E-staklo i S-staklo).

Kao materijali matrice koriste se plastomeri i duomeri. Najčešće se koriste duomerne smole poput epoksidne smole, smole poliestera i viniestera. Fenolne i poliimidne smole rjeđe se koriste zbog težeg rukovanja i nešto veće cijene. Poliesterska matrica koristi se za komercijalne proizvode dok epoksidne smole imaju bolja mehanička svojstva te se koriste u zrakoplovnoj industriji. Da bi se postigla što bolja vlažnost vlakana smole moraju imati dovoljno nisku viskoznost.

Postoje dvije vrste namatanja, ovisno prolaze li vlakna kroz smolu prije namotavanja ili se koriste preprezi. Naknadno impregniranje je postupak kod kojeg se najprije vrši namotavanje vlakana na jezgru te se zatim impregnira smolom. Naknadno impregniranje se rjeđe koristi. Postoji suho i mokro namotavanje.

Suho namotavanje rjeđe se primjenjuje od mokrog namotavanja. Kod suhog namotavanja, namotavaju se preprezi namotani na svitke. Vlakna u tom slučaju ne prolaze kroz kupku smole. Postupak je lako kontroliran. Nedostatak preprega je skladištenje preprega u posebnim uvjetima kako ne bi došlo do umrežavanja te veća cijena.

Kod mokrog namatanja vlakna prije namatanja prolaze kroz kupku smole ili valjke natopljene smolom. Kupka smole je ugrijana, te se time povećava viskoznost smole, odnosno vlaženje vlakana. Kontrola nanešenog sloja smole je otežana, a udio smole ovisi o viskoznosti, vlaženju, brzini namotavanja, te naprezanju vlakana. Mokro namotavanje se teže kontrolira u odnosu na suho namotavanje, ali je jeftinije. Umrežavanje se naknadno pri sobnoj temperaturi ili u pećima.

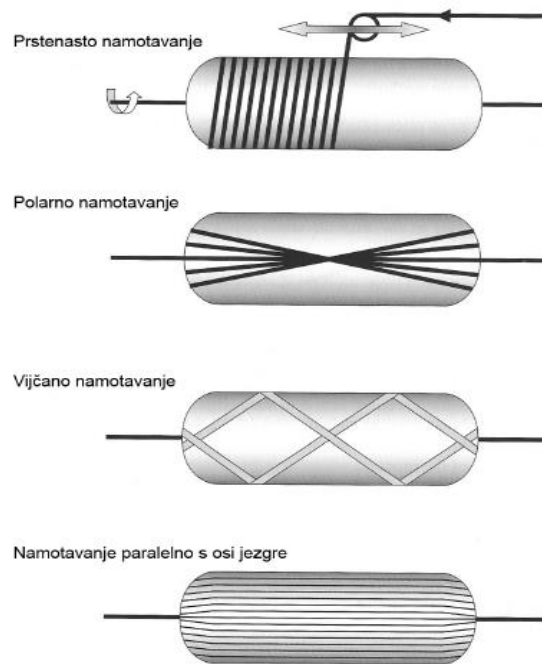
Postupak namotavanja može se podijeliti na četiri koraka: priprema vlakana i jezgre, namotavanje, umrežavanje i uklanjanje jezgre.

Priprema počinje stavljanjem svitaka vlakana i jezgri na stroj za namotavanje. Jezgru se oblaže slojem odvajča kako bi se omogućilo lakše vađenje jezgre. Postoji više vrsta jezgri ovisno o načinu skidanja filamenta. Jezgre su najčešće izrađene od čelika ili aluminija. Postoje i jezgre za jednokratnu upotrebu koje se uništavaju kako bi se oslobodio komad.

Namotavanje može biti prstenasto, polarno, paralelno s osi jezgre i vijčano. Najčešće se koriste polarno i vijčano namotavanje. U postupku polarnog namotavanja jezgra miruje, a ruka stroja za namotavanje rotira oko uzdužne osi, nagnuta pod određenim kutem. Kad se ruka jednom okrene oko osi jezgra se zarotira za debljinu vlakna. Postupak se ponavlja u pozitivnim i negativnim kutevima dok se ne dobije željena debljina sloja. Kod vijčanog namatanja jezgra se kontinuirano okreće dok se ruka stroja giba naprijed-nazad određenom brzinom uzduž osi jezgre. Tim postupkom potrebno je više prolaza kako bi se pokrila cijela



površina jezgre jer se vlakna ne nalaze jerdno uz drugo [13]. Uzori namatanja nalaze se na slici 12.



**Slika 12. Uzorci namotavanja [13]**

Prednosti namotavanja vlakana:

- visoka ponovljivost postupka,
- koriste se kontinuirana vlakna koja su u smjeru naprezanja,
- niska cijena opreme i izrade,
- mogu se proizvoditi dijelovi velikih dimenzija,
- jeftin materijal,
- visoki omjer čvrstoće i gustoće,
- visoki udio vlakana.

Nedostaci namotavanja vlakana:

- poteškoće kod izrede kompleksnih oblika,
- skup proces izrade jezgri,
- loša kvaliteta površine,
- potreba za naknadnom obradom,

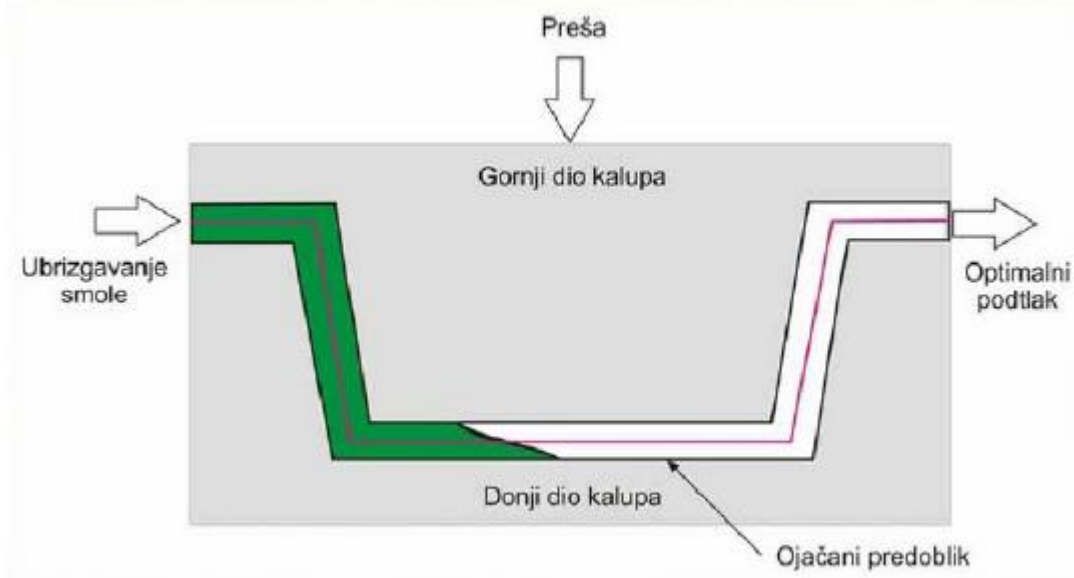
- skupi strojevi,
- kopiciran proces izračunavanja kuta namatanja vlakana.



**Slika 13. Namatanje ugljičnih vlakana [17]**

### **3.5. Ubrizgavanje smole u kalup**

Praoblikovana vlakna postavljaju se u kalup (mogu se koristiti razni oblici koji se drže vezivom). Kalup se zatim zatvara i u njega se ubrizgava polimer (može se koristiti i vakuum). Nakon što je kalup popunjen mjesta na kojima je matrica ubrizgana se zatvaraju te se nakon toga odvija umrežavanje na sobnoj ili povišenim temperaturama . Za korištenje prikladne su sve vrste vlakana i matrica. Postupak na slici prikazan je slikom 14.



**Slika 14. Postupak ubrizgavanja smole u kalup [18]**

Prednosti ubrizgavanja smole u kalup:

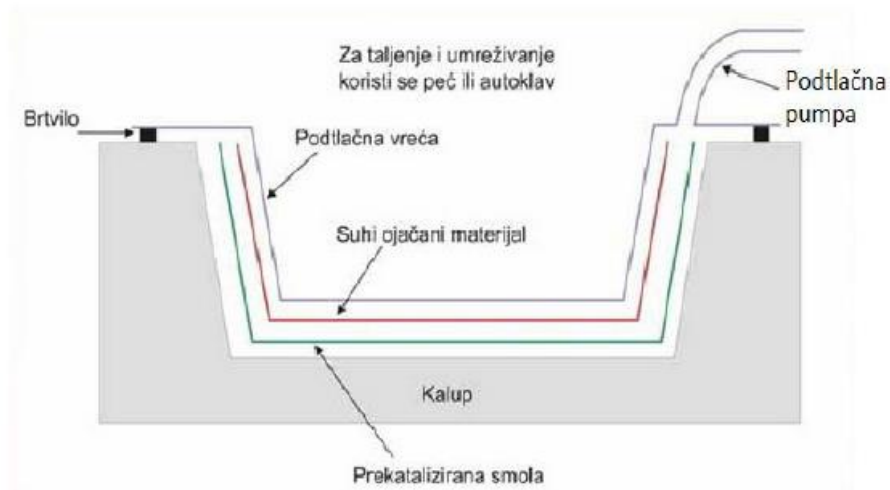
- dobivanje kompozita s visokim udjelom vlakana i niskim udjelom pukotina,
- polimer je zatvoren u kalupu, ne predstavlja opasnost za okoliš,
- bolja kvaliteta površine.

Nedostaci ubrizgavanja smole u kalup:

- skup i težak alat
- proizvodnja je ograničena na manje komade,
- moguća je pojava dijelova kompozita koja nisu popunjena smolom, što povećava škart.

### 3.6. Infuzija sloja smole

Postupak počine postavljanjem suhih ojačala u kalup te se između njih postavljaju slojevi smole u polukrutom stanju. Matrica se nalazi na specijalnom papiru. Pomoću vakuumpumpe se izvlači zrak. Nakon toga slijedi zagrijavanje koje dovodi smolu u tekuće stanje, te ona ispunjava prostor između ojačanja. Koriste se sve vrste epoksidnih matrica i vlaknastih ojačala. Infuzija sloja smolom nalazi se na slici 15.



**Slika 15. Postupak infuzije sloja smole [18]**

Prenosi postupka infuzije smole u kalup:

- dobivanje ekološki prihvatljivih kompozita s visokim udjelom vlakana,
- dobra mehanička svojstva,
- manji troškovi nego u slučaju preprega,
- manja mogućnost pojave neispunjenih područja smolom.

Nedostaci postupka infuzije smole u kalup:

- postupak korišten samo u zrakoplovnoj industriji,
- potrebna je peć i vakuumsko pakiranje,
- alat mora izdržati temperature od 60 °C-100 °C.

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

Da bi se kompozitni materijali pravilno primjenjivali moramo znati njihova mehanička svojstva, te kako konstituenti kompozita na njih utječu. U ovom radu provedena su ispitivanja određivanja prividne vlačne čvrstoće obruča, određivanja karakteristika vanjskog opterećenja plastičnih cijevi postupkom paralelnih ploča te određivanje masenog udjela ojačala.

Izrađeno je deset uzoraka kompozitnih cijevi promjera 100 mm postupkom namatanja. Debljine stjenki poliesterskih uzoraka iznosile su 7 mm, a vinilesterskih uzoraka 8 mm. Uzorci sadrže ista ojačavala (S- staklena vlakna) te se razlikuju po materijalu matrice. Korištene su vinil esterska i poliesterska matrica. Uzorci su prikazani na slikama 16 i 17.

### 4.1.1. Poliesterska matrica

Poliester se često koristi za cijevi, spremnike i komponente visokih performansi u nautistici i autoindustriji. Češće se koristi zbog jednostavnije proizvodnje nego vinil-ester matrica. Jeftina je, ali ograničena mehaničkim svojstvima. Nije primjerena za primjenu gdje su potrebna visoka mehanička svojstva ili pri povišenim temperaturama.



Slika 16. Uzorci s poliesterskom matricom

#### 4.1.2. Vinil esterska matrica

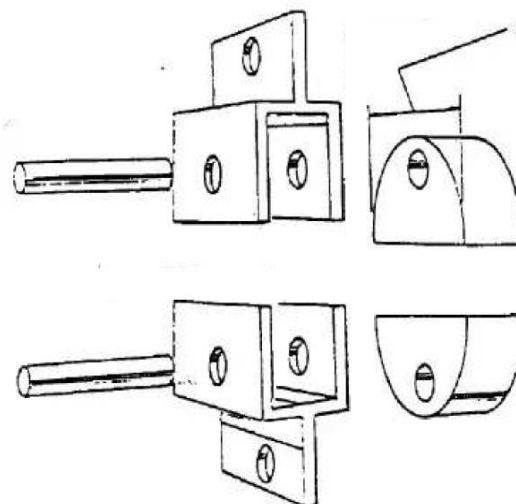
Vinil esterske smole imaju posjeduju veću istezljivost nego poliesterske smole. To znači da se hladno izobličiti da pritom ne puknu i mogu apsobirati veći udarac bez štete. Otpornije su na „hidrolizu“, proces apsorbicije vode u polimer u odnosu na poliesterske smole.



**Slika 17. Uzorci s vinil esterskom matricom**

#### 4.2. Određivanje prividne vlačne čvrstoće obruča [14]

Ispitivanje je provedeno prema normi ASTM D2290 na univerzalnom stroju za ispitivanje mehaničkih svojstava EU 40mod. Postupak se temelji na opterećenju uzorka razdvojenih diskova koji primjenjuju vlačno naprezanje u uzorku. Mjeri se prividna vlačna čvrstoća, a ne vlačna čvrstoća zbog momenta savijanja koji se događa zbog promjene konture uzoraka uzrokovano razdvajanjem diskova. Alat za ispitivanje nalazi se slikama 18 i 19.



**Slika 18.** Skica alata za ispitivanje vlačne čvrstoće [14]



**Slika 19.** Alat korišten za ispitivanje vlačne čvrstoće

Ispitni uzorci odrezani su na dužinu 25 mm i ispitivani konstantnom brzinom opterećenja od 10mm/min. Ispitivanje se provodilo do puknuća uzorka i mjerena je maksimalna sila. Na slici 20. prikazan je postupak ispitivanja.





**Slika 20. Kidalica EU 40mod**

Na slici 21. nalaze se uzorci nakon ispitivanja.



**Slika 21. Uzorci nakon ispitivanja**



Uzorcima je prije ispitivanja izmjerena debljina stjenke i dužina, čime možemo izračunati površinu presjeka na kojoj djeluje naprezanje. Slovo V označuje vinil estersku smolu, a slovo P poliestersku smolu. Rezultati su prikazani u tablici 2.

**Tablica 2. Mjerenje poprečnog presjeka uzorka**

Uzorak	Debljina stjenke t, mm	Duljina uzorka l, mm	Površina $A_m$ , mm <sup>2</sup>
V3	6,85	23,35	159.95
V4	6,93	23,79	164.86
V5	6,78	23,48	159.19
P1	8,04	23,86	191.83
P4	8,59	23,20	199.29
P5	8,15	23,71	193.24

Iznosi maksimalnih sila za uzorke prikazani su u tablici 3.

**Tablica 3. Prikaz maksimalne sile za svaki uzorak**

Uzorak	$F_{max}$ [N]
V3	89840
V4	90530
V5	91649
P1	110593
P4	100928
P5	109392

Zatim prema formuli (4.1) računamo prividno vlačno naprezanje:

$$\sigma_a = P_b / 2A_m \quad (4.1)$$

Gdje je:

$\sigma_a$  = prividna vlačna čvrstoća [N/mm<sup>2</sup>],

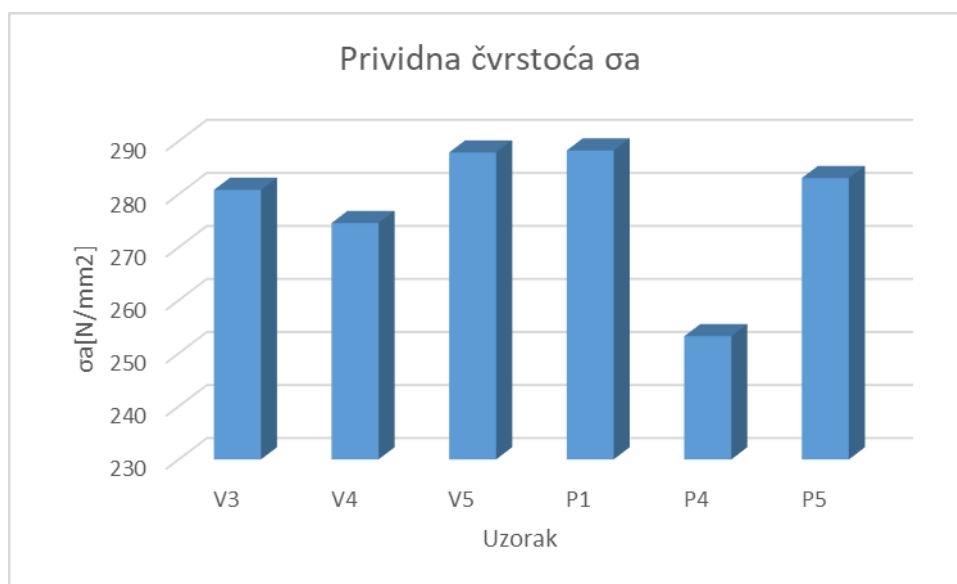
$P_b$  =maksimalna sila [N],

$A_m$  = minimalna površina presjeka, [mm<sup>2</sup>].

Rezultati su prikazani u tablici 4 i slici 22.

**Tablica 4. Rezultati prividne vlačne čvrstoće za svaki uzorak**

Uzorak	$\sigma_a$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Srednja vrijednost	standardna devijacija, $\sigma$
V3	280.84	281.09	6.649
V4	274.57		
V5	287.86		
P1	288.26	274.84	18.907
P4	253.22		
P5	283.05		



**Slika 22. Dijagram prividne čvrstoće uzoraka**

Rezultatima ispitivanja dobili smo približne vrijednosti prividne čvrstoće za oba materijala matrice.

### 4.3. Određivanje karakteristika vanjskog opterećenja plastičnih cijevi postupkom paralelnih ploča

Ovo ispitivanje također je provedeno na kidalici kao i u prijašnjem ispitivanju. Ispitivanje je provedeno prema standardu ASTM D2412 – Standardna ispitna metoda za određivanje karakteristika vanjskog opterećenja plastičnih cijevi postupkom paralelnih ploča. [15] Na slici je 23. prikazano ispitivanje uzorka.



**Slika 23. Prikaz postupka opterećivanja uzorka**

Uzorci su izrezani na duljinu najbližu jednom inču (25.4 mm) i postavljeni između dvije paralelne ploče. Ispitni uzorak se zatim tlačno opterećuje brzinom od 10mm/min. Ispitivanje se provodilo dok progib cijevi nije iznosio 30% prosječnog unutarnjeg promjera. U tablici 5. prikazana su mjerenja ispitnih uzoraka potrebna za izračun.

Tablica 5. Mjerenje prosječne duljine uzorka

V1		l [mm]
	1	23.84
	2	23.57
	3	23.51
	4	23.79
	5	23.63
	$\bar{x}$	23.668
V2		l [mm]
	1	23.61
	2	23.72
	3	23.57
	4	23.68
	5	23.64
	$\bar{x}$	23.644
P2		l [mm]
	1	23.22
	2	23.41
	3	23.34
	4	23.23
	5	23.09
	$\bar{x}$	23.258
P3		l [mm]
	1	24.92
	2	24.15
	3	24.64
	4	24.15
	5	25.59
	$\bar{x}$	24.69

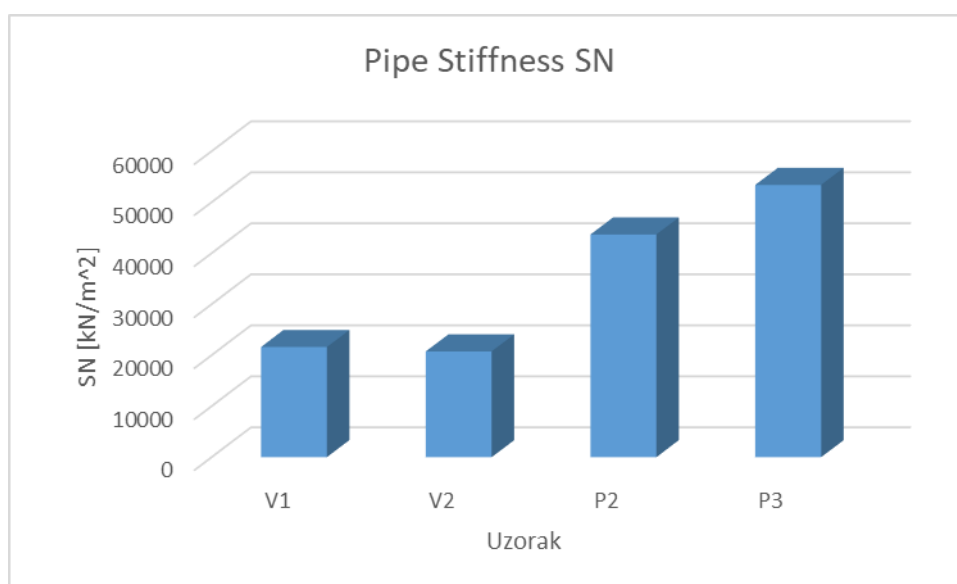
Zatim se za svaki ispitni utorak očitava silu pri 3%-nom progibu iz dijagrama, te računa sila po milimetru uzorka. SN (pipe stiffness) po formuli (4.2) iznosi:

$$SN=F/\Delta y \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (4.2)$$

Rezultati su prikazani u tablici 6 i slici 24.

Tablica 6. Rezultati SN za svaki uzorak

	F [N/mm]	$\Delta y$ [mm]	SN[kN/m <sup>2</sup> ]	Prosječna vrijednost	standardna devijacija, $\sigma$
V1	65.49	3.03	21610	21175	435
V2	64.29	3.1	20740		
P2	137.59	3.15	43680	48540	4860
P3	166.06	3.11	53400		



Slika 24. Dijagram PS za uzorke poliesterske i vinil esterske smole

Ispitivanjima je utvrđeno da vinil esterska matrica ima manji iznos krutosti SN, što znači da je otpornija na deformaciju i ima veću mogućnost absorpcije energije prije pojave loma.

Ovisno o rezultatima ispitivanja, cijevi se po normi ISO 10639 klasificiraju u sljedeće skupine prikazane u tablici 7.

**Table 7. Klase krutosti prema ISO 10639**

Nominalna krutost	
Seriya S1	Seriya S2
630	500
1250	1000
2500	2000
5000	4000
10000	8000

Seriya S1 je primarna serija koja se koristi, dok je serija S2 alternativna. Uspoređujući rezultate ispitivanja s klasama krutosti prema ISO standardu zaključuje se da oba uzorka pripadaju klasi krutosti SN 10000 što se u velikoj mjeri može povezati s visokim masenim udjelom stakla.

#### 4.4. Određivanje masenog udjela ojačavala

Budući da su vlakna u kompozitu glavni nositelji opterećenja, informacijama o njihovom udjelu u kompozitu dobivamo jasniju sliku o mehaničkim svojstvima materijala. Ispitivanje je provedeno prema normi EN ISO 1172. Iz jednog uzorka poliesterske cijevi izrezana su tri uzorka te su iz vinil esterske cijevi također izrezana tri uzorka. Tih šest uzoraka stavljeni su svaki u posebni keramički lončić te stavljeni u peć pri 600 °C. Matrica tim postupkom izgori te u lončiću ostaju samo staklena vlakna. Na slici 25 prikazani su lončići s uzorcima.



Slika 25. Lončići s uzorcima

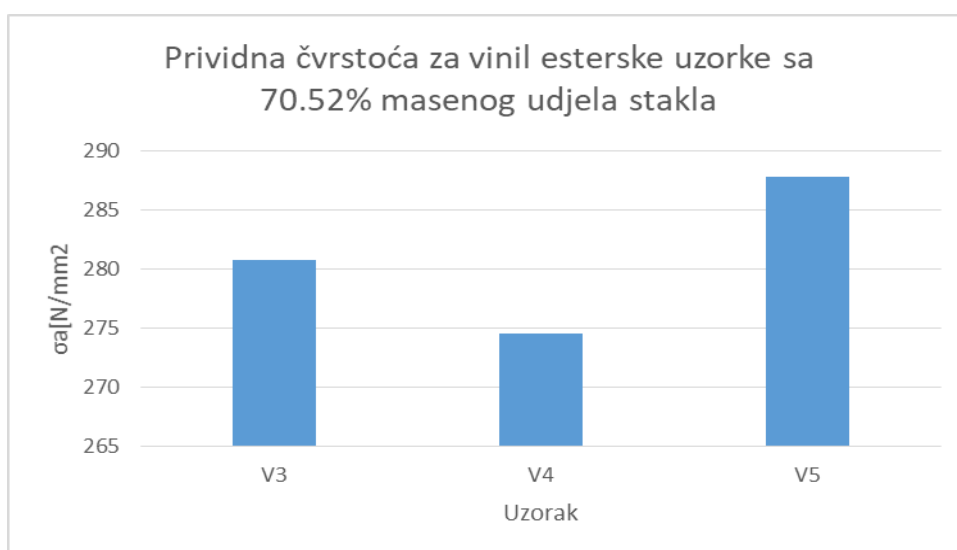
Na početku ispitivanja odredimo masu lončića i uzoraka, te na kraju možemo izračunati masu staklenih te konačno njihov maseni udio. Rezultati za kompozite s poliesterskom smolom i vinil esterskom smolom nalaze se u tablicama 8 i 9. Slovo L označava lončić, slovo U uzorak, a slovo O ojačalo.

Tablica 8. Maseni udio vlakana u poliesterskom kompozitu

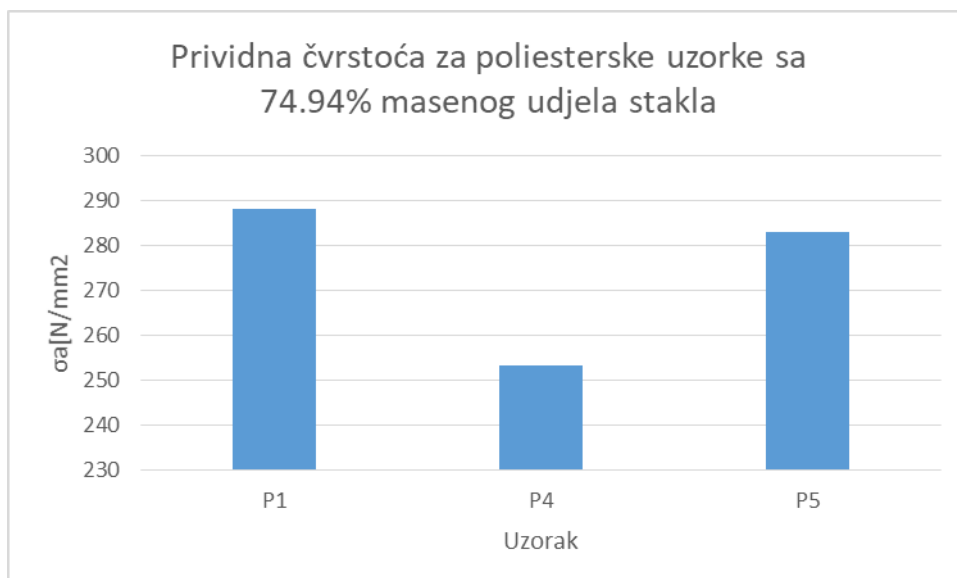
Uzorak	m(L)	m(L+U)	m(U)	m(L+O)	m(O)	W(O) %
1	28,3035	33,1201	4,8166	31,9072	3,6037	74,82
2	28,6994	33,5333	4,8339	32,3160	3,6166	74,82
3	26,6662	31,3084	4,6422	30,157	3,4908	75,20
<b>Prosječna vrijednost:</b>						<b>74,94</b>

Tablica 9. Maseni udio vlakana u vinil esterskom kompozitu

Uzorak	m(L)	m(L+U)	m(U)	m(L+O)	m(O)	W(O) %
1	25,5902	29,0825	3,4923	28,0414	2,4512	70,19
2	26,0706	29,9480	3,8774	28,8256	2,7550	71,05
3	44,7833	48,8686	4,0853	47,6564	2,8731	70,33
<b>Prosječna vrijednost:</b>						<b>70,52</b>



Slika 26. Dijagram prividne čvrstoće za vinil esterske uzorke sa 70.52% masenog udjela stakla





**Slika 27. Dijagram prividne čvrstoće za poliesterske uzorke s 74.94% masenog udjela stakla**

Ispitivanjem je utvrđeno da se kompoziti razlikuju po masenom udjelu ojačavala.

**4.5. Analiza mikrostrukture**

Da bi se mikrostruktura mogla analizirati uzorci se prvo moraju izrezati ručnom pilom. Međutim površina je tad pregruba i ne može se promatrati mikroskopom te je potrebna daljnja priprema. Promatrani su uzorci P2 i V2.

Uzorak se prvo brusi. Brušenje je odrađeno na uređaju PRESI Minitech 233. Postolje rotira brzinom 300 okr./min, te ima vodeno hlađenje i podmazivanje. Koristili su se brusni papiri od najgrubljeg do najfinijeg (120, 320, 600, 1200, 2400 i 4000). Nakon brušenja uzorci se poliraju. Poliranje je odrađeno na uređaju Struers DAP-V. Njegovo postolje se okreće brzinom od 150 okr/min te koristi lubrikant za podmazivanje i hlađenje. Za poliranje su se još koristile dijamanta pasta s promjerom čestica 3  $\mu\text{m}$  i tkanina. Uređaji su prikazani na slikama 28 i 29.



**Slika 28. Uređaj PRESI Minitech 233**



**Slika 29. Uredaj Struers DAP-V**

Na slici 30. prikazani su uzorci nakon brušenja i poliranja.



**Slika 30. Uzorci nakon poliranja i brušenja**

Mikrostruktura je zatim pregledana na svjetlosnom mikroskopu OLYMUS GX51 pod povećanjima 50x, 100x, 200x i 500x. Mikroskop je prikazan na slici 31.

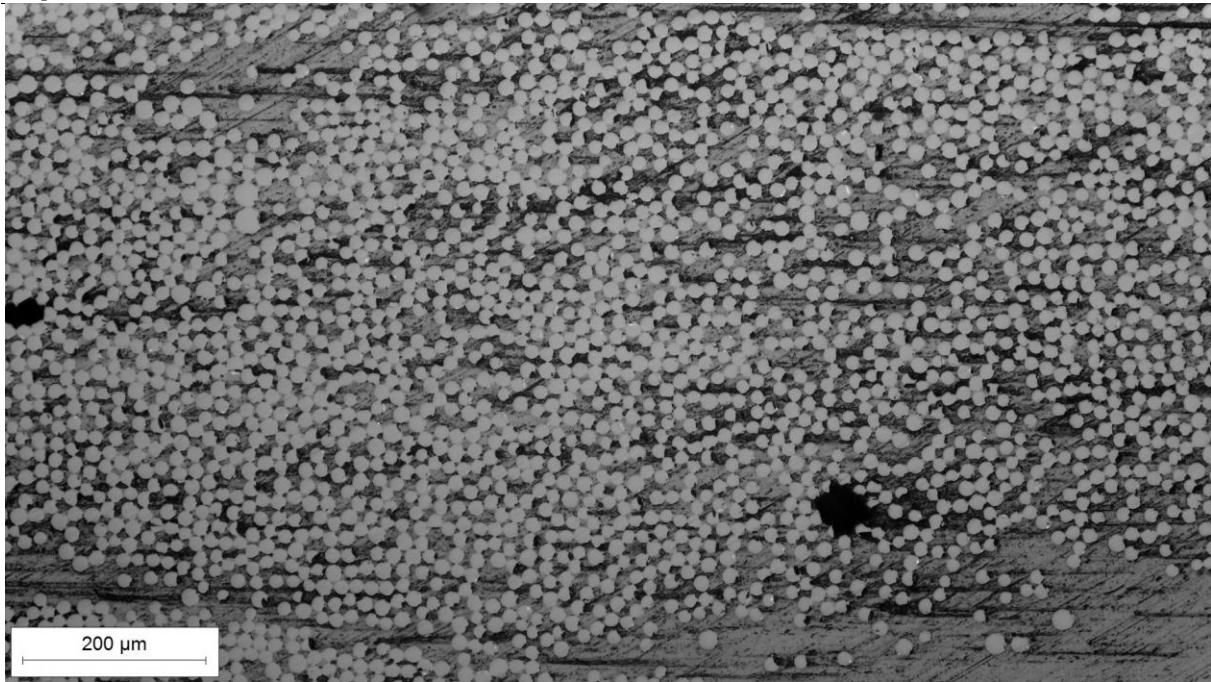


**Slika 31. Mikroskop OLYMUS GX51**

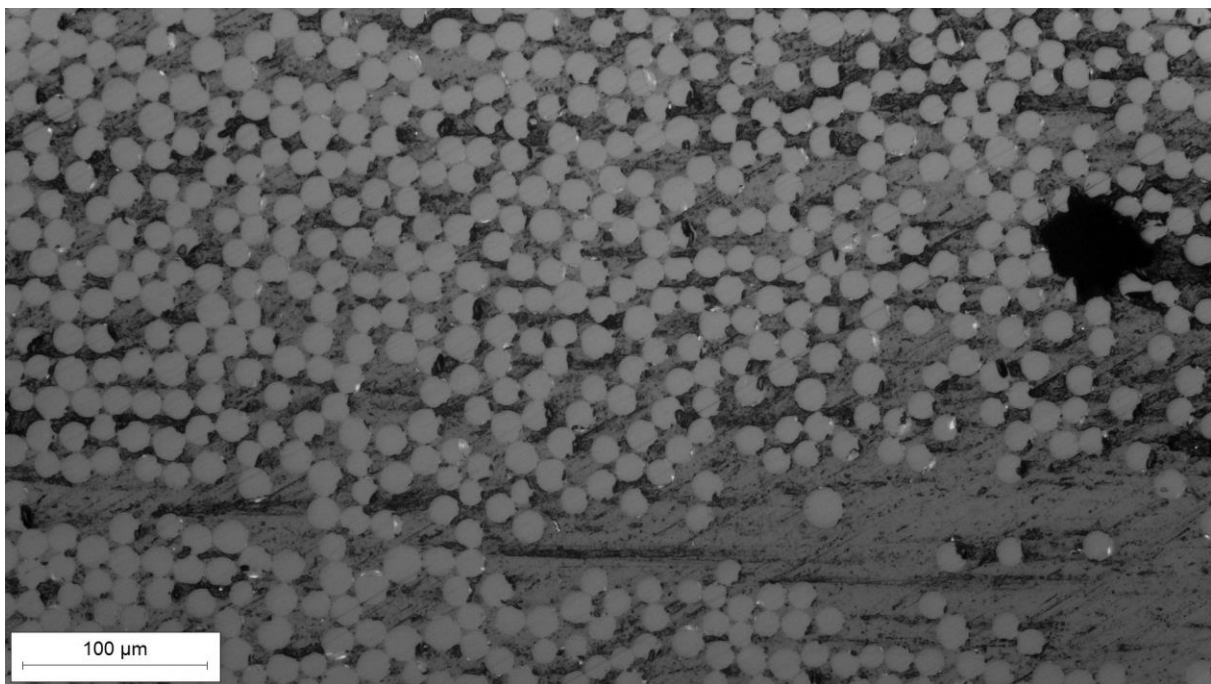
Mikrostrukture su prikazane na sljedećim slikama:



**Slika 32. Uzorak P2 mikrostrukura 1**

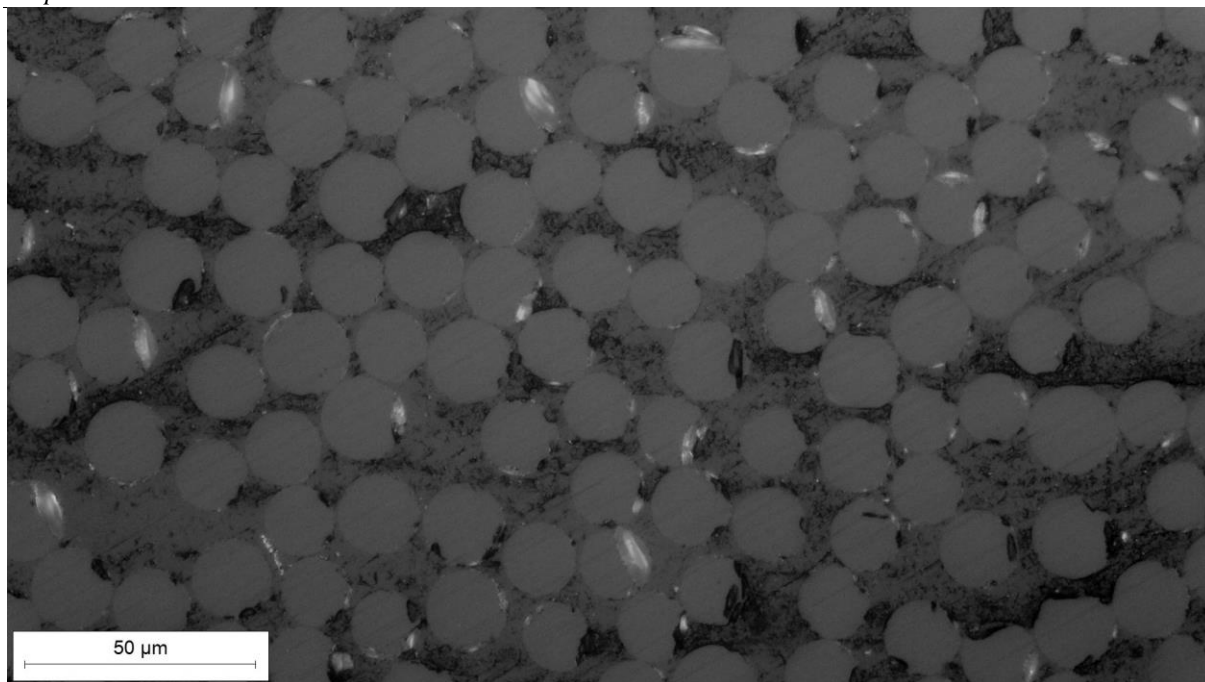


**Slika 33. Uzorak P2 mikrostrukura 2**

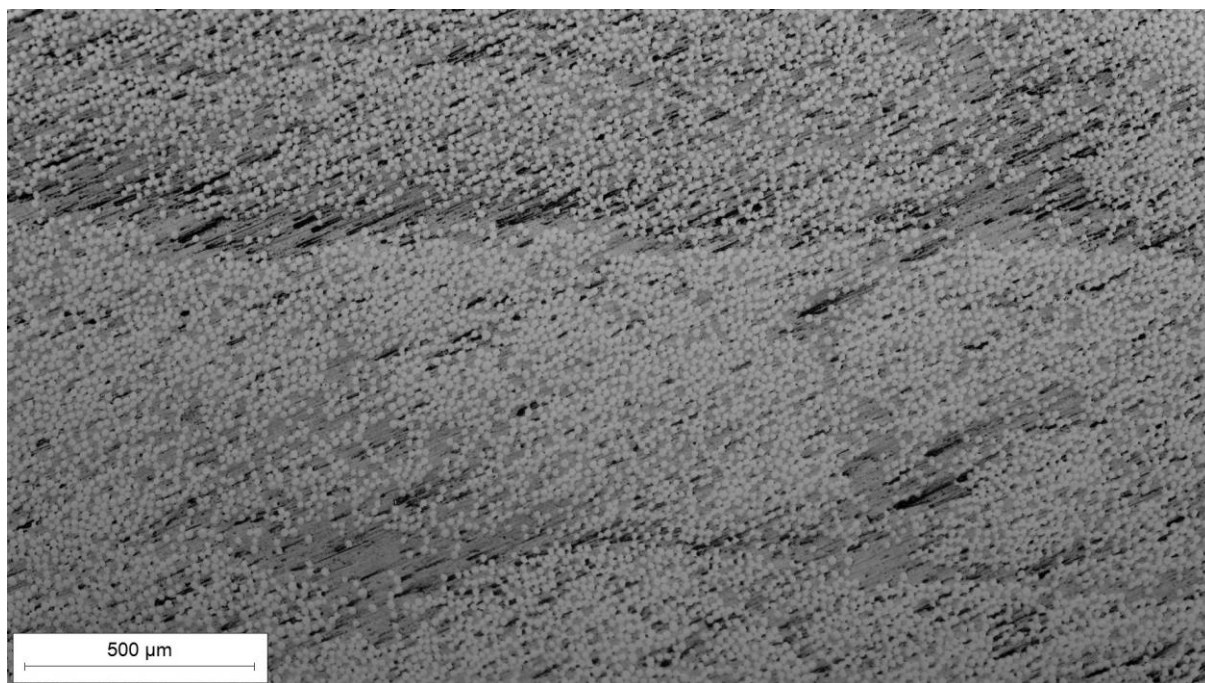


**Slika 34. Uzorak P2 mikrostrukura 3**

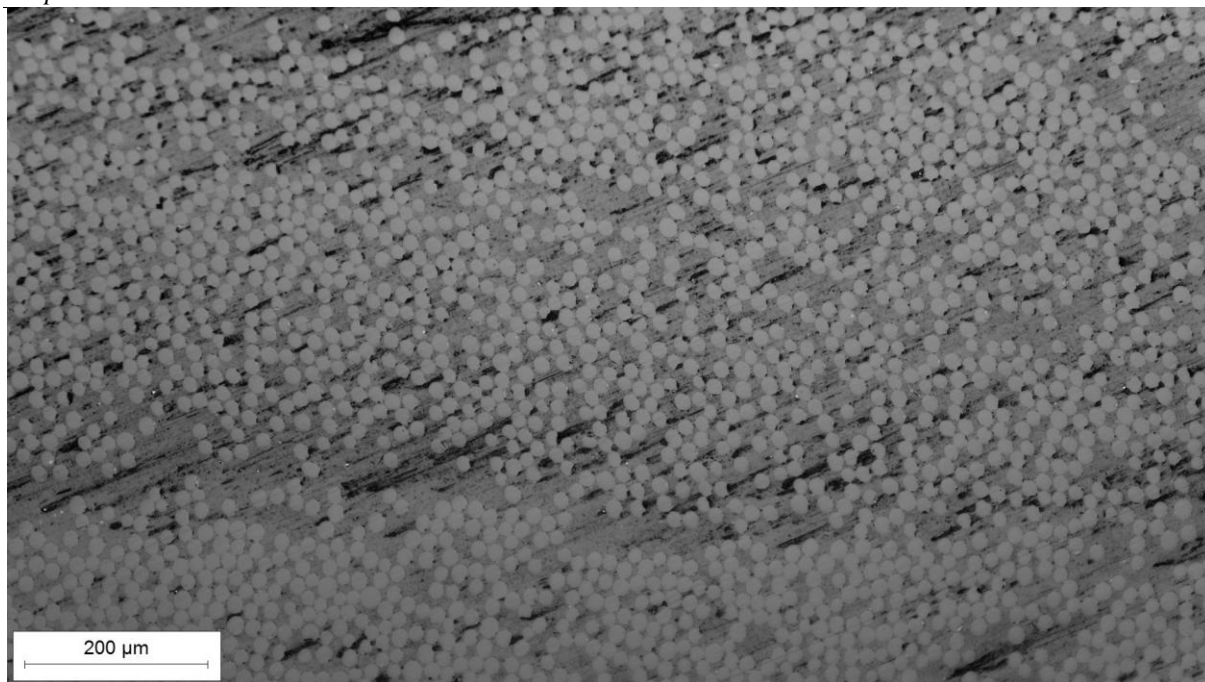




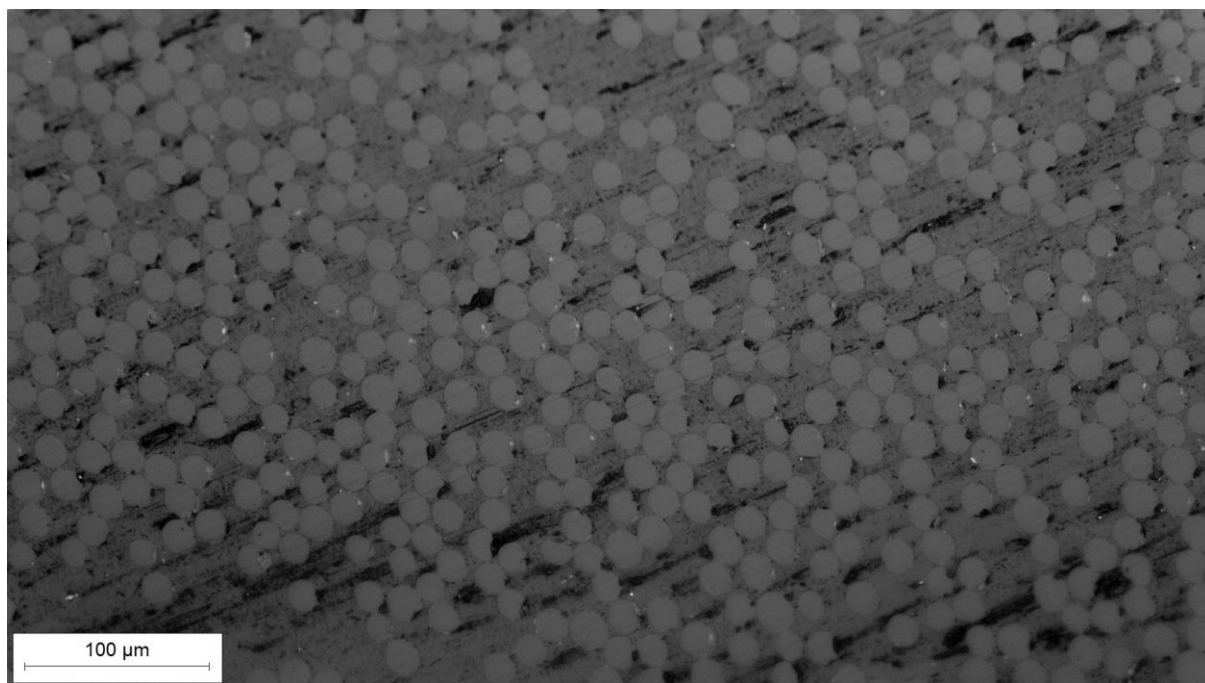
**Slika 35. Uzorak P2 mikrostrukura 4**



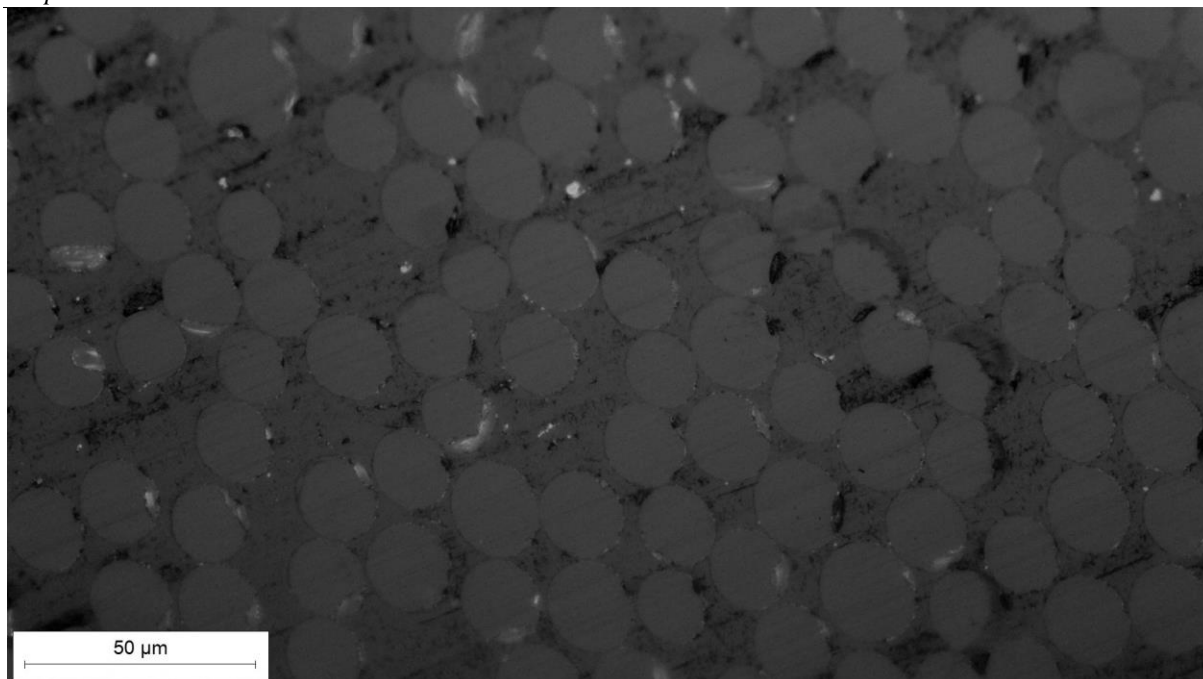
**Slika 36. Uzorak V2 mikrostrukura 1**



**Slika 37. Uzorak V2 mikrostrukura 2**



**Slika 38. Uzorak V2 mikrostrukura 3**



**Slika 39. Uzorak V2 mikrostrukura 4**

#### **4.4. Rasprava**

Rezultatima mjerenja masenog udjela staklenih vlakana u matrici možemo zaključiti da udio vlakna ima jako bitan utjecaj na mehanička svojstva kompozita. Premda su očekivana bolja mehanička svojstva vinil esterske matrice dobivamo približno jednake iznose prividne čvrstoće obruča zbog većeg udjela staklenih vlakana u kompozitu. Bitnu razliku između materijala matrica vidimo u tlačnom ispitivanju uzoraka gdje vinil esterska matrica pokazuje manju krutost. Analizom mikrostrukture poliesterskog uzorka zaključujemo da se u mikrostrukтури nalaze poroziteti i mjesta nepolimerizane smole što negativno utječe na mehanička svojstva.

## 5. ZAKLJUČAK

Razvojem kompozitnih materijala i postupaka njihove prerade dobivamo sve bolje materijale s boljim mehaničkim svojstvima. Koristeći kompozite štedimo na masi, ali se mogu postići i jeftiniji konačni proizvodi s boljim eksploatacijskim svojstvima. U moderno doba posebno su zanimljivi zbog mogućnosti recikliranja i time manjeg zagađenja za okoliš.

U ovom radu provedena su ispitivanja mehaničkih svojstava, masenog udjela ojačala i analiza mikrostrukture kako bi se ustanovio utjecaj matrice na neka mehanička svojstva kompozita. Rezultati bi bili vjerodostojniji kada bi se uspoređivali kompoziti s različitim matricama i istim udjelom ojačavala.

Karakterizacijom materijala matrice u ovom radu pokazuje se zašto se poliesterske smole koriste za komercijalne proizvode, a vinil esterske smole za proizvode gdje su potrebna bolja mehanička svojstva.

Provedenim ispitivanjima dobiveni su sljedeći rezultati:

Iznos prosječne prividne vlačne čvrstoće iznosi 281.09 N/mm<sup>2</sup> za uzorke s poliesterskom matrice, dok za uzorke s vinil esterskom matricom iznosi 274.84 N/mm<sup>2</sup>. Krutost cijevi (PS) za poliesterske uzorke iznosi 51.29 N/mm<sup>2</sup>, a za vinil esterske 16.12 N/mm<sup>2</sup>. Poliesterski uzorci su imali maseni udio staklenih vlakana 74.94 %, dok je kod vinil esterskih iznosio nešto manje, 70.52 %.

Optimizacijom postupaka prerade kompozita, te pravilnim odabirom materijala matrice i ojačavala dobivamo vrlo dobra mehanička svojstva kompozita. Ti materijali će imati sve veći potencijal (i sad imaju) da zamjene konvencionalne materijale u industriji. Poseban naglasak je na ekološkoj prihvatljivosti tih materijala i smanjenju zagađenja okoliša.

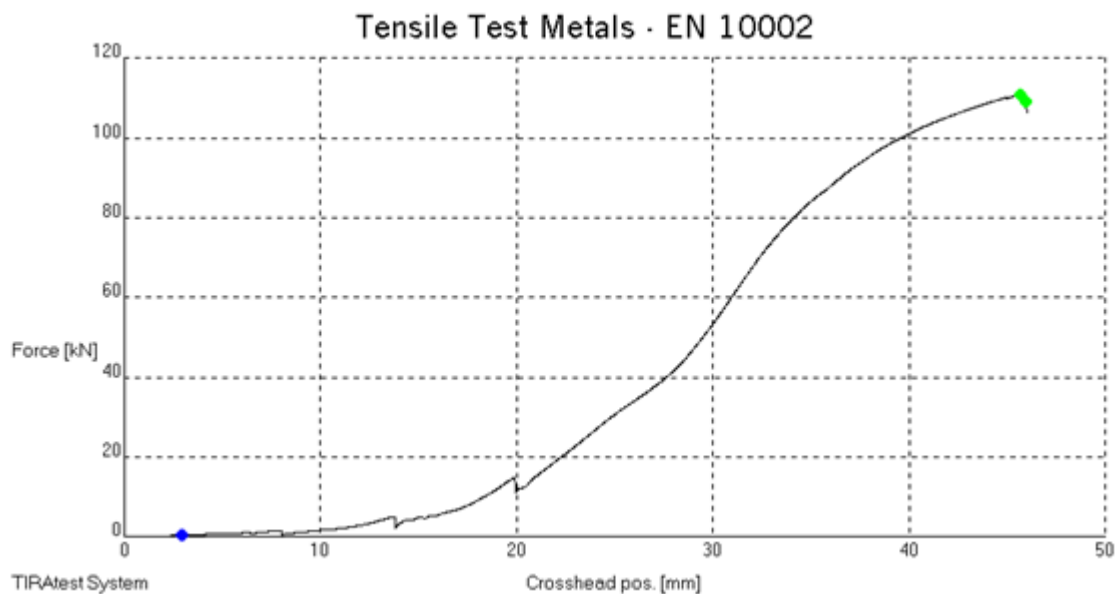


## LITERATURA

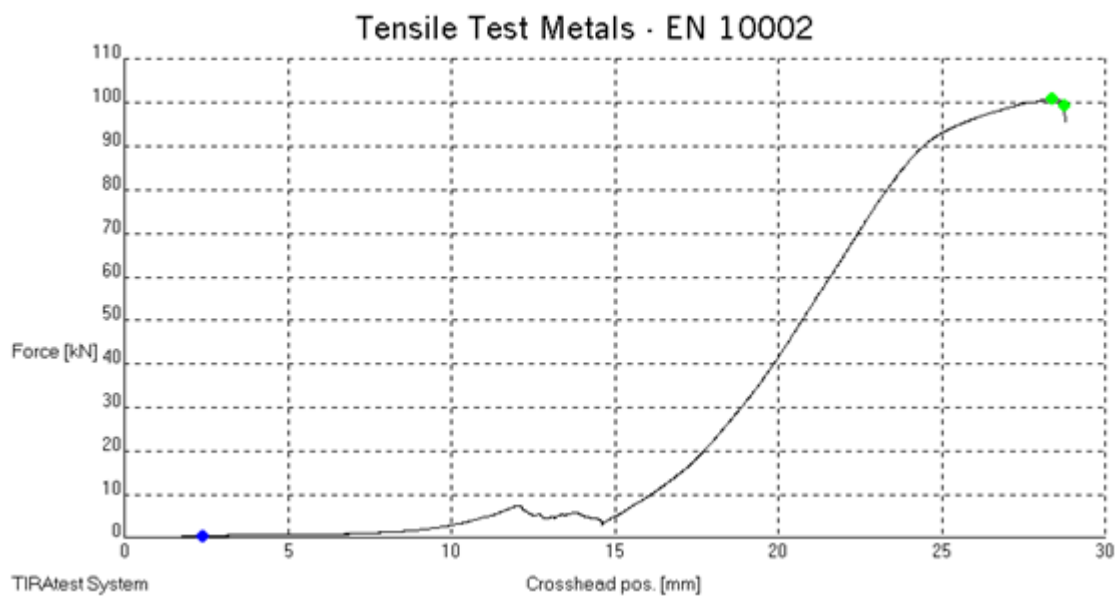
- [1] Z. Schauerl: Kompozitni materijali – nastavni materijali, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2018.
- [2] Igor Gabrić, Slaven Šitić: Materijali 1, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, Split 2012.
- [3] Danko Ćorić, Tomislav Filetin – Materijali u zrakoplovstvu, interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2011.
- [4] N. Sonički: Tehnički materijali, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac 2013.
- [5] Smojver I.: Mehanika kompozitnih materijala – interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2006.
- [6] Filetin T., Kovačićek F., Indof J. : Svojstva i primjena materijala: čelici i željezni ljevovi, laki i obojeni materijali, konstrukcijska keramika, polimerni materijali, kompozitni materijali i drvo; 2. izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [7] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [8] Z. Kolumbić, N.Tomec: Materijali – Kompoziti – nastavni materijali, Filozofski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka , 2005.
- [9] <https://www.fsb.unizg.hr/kmb/200/230/kmb233.html> , dostupno 18.01.2021.
- [10] Aluga R. : Ispitivanje žilavosti kompozitnih materijala, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2010.
- [11] Akovali G.: Handbook of Composite Fabrication, RAPRA Technology LTD., Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, UK, 2001.
- [12] T. Filetin, G. Marić : Napredne tehnologije materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [13] Diplomski rad: Luka Ribarić, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009.
- [14] ASTM D2290 – Standard Test Method for Appaerent Hoop Tensile Strenght of Plastic or Reinforced Plastic Pipe

- [15] ASTM D2412 – Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading <https://www.composites.media/mikrosam-composites-industry-machines/> , dostupno 26.1.2021.
- [16] M. Šercer, A. Pilipović: Proizvodnja kompozitnih tvorevina. <http://www.scribd.com/doc/233375901/Kompozitni-materijali#scribd>, dostupno 21.01.2021.

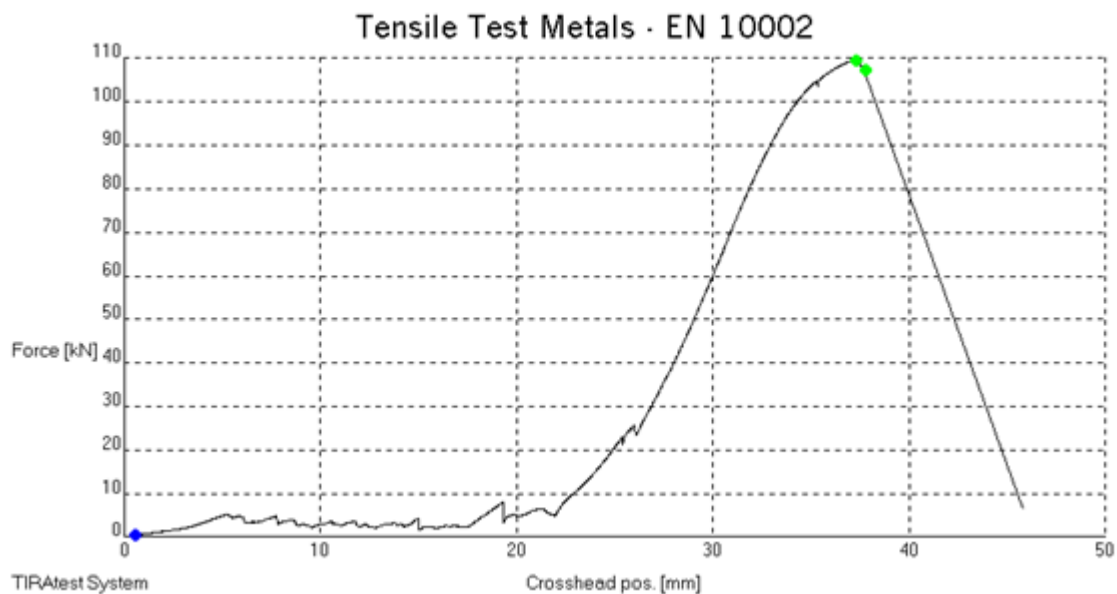
## PRILOZI



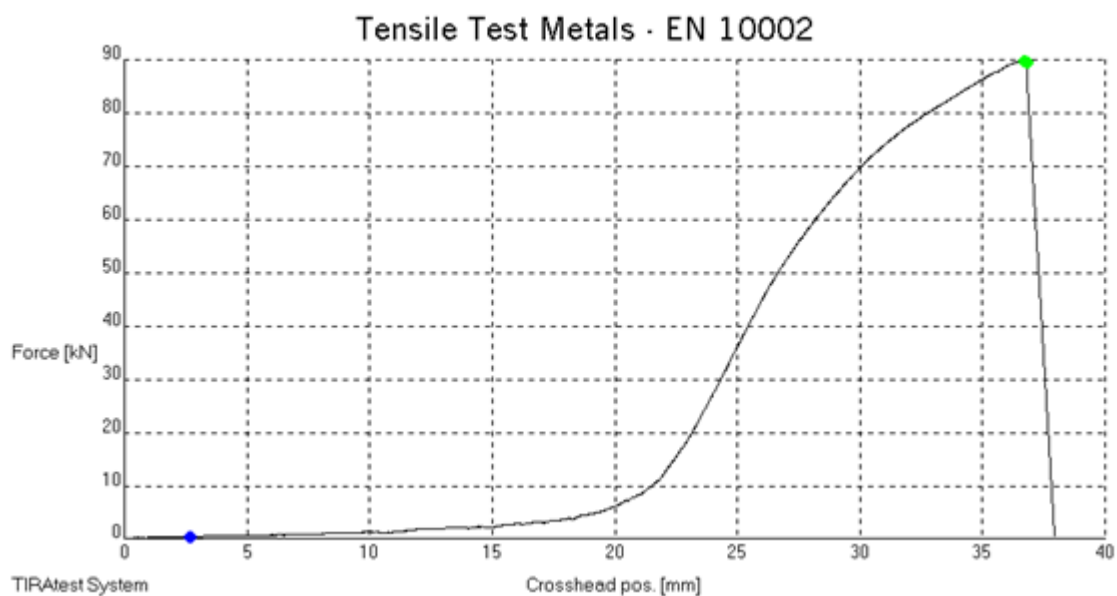
Slika 40. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak P1



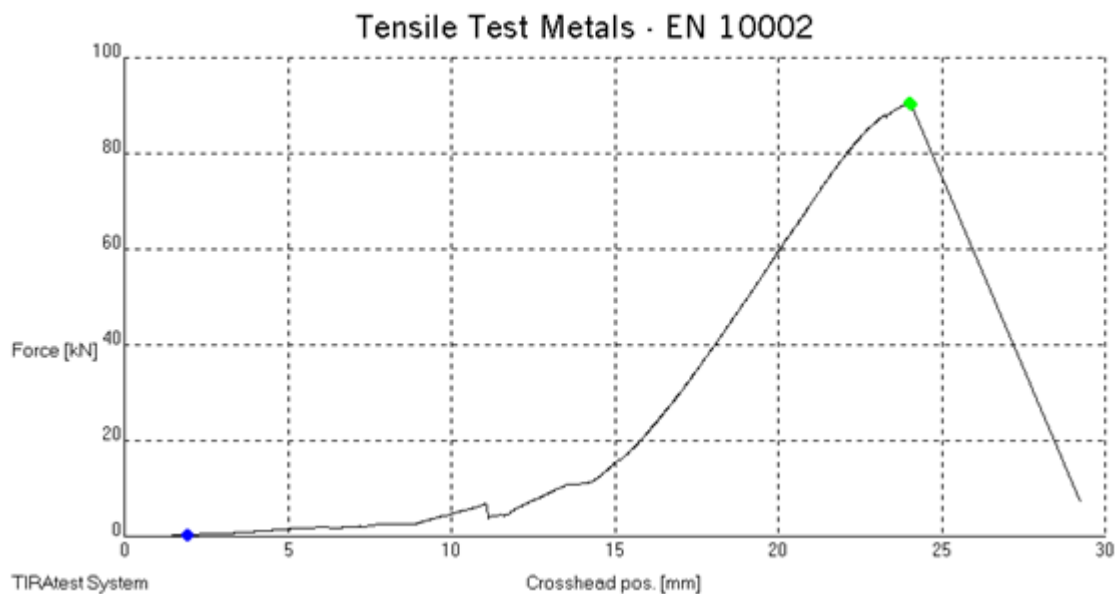
Slika 41. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak P4



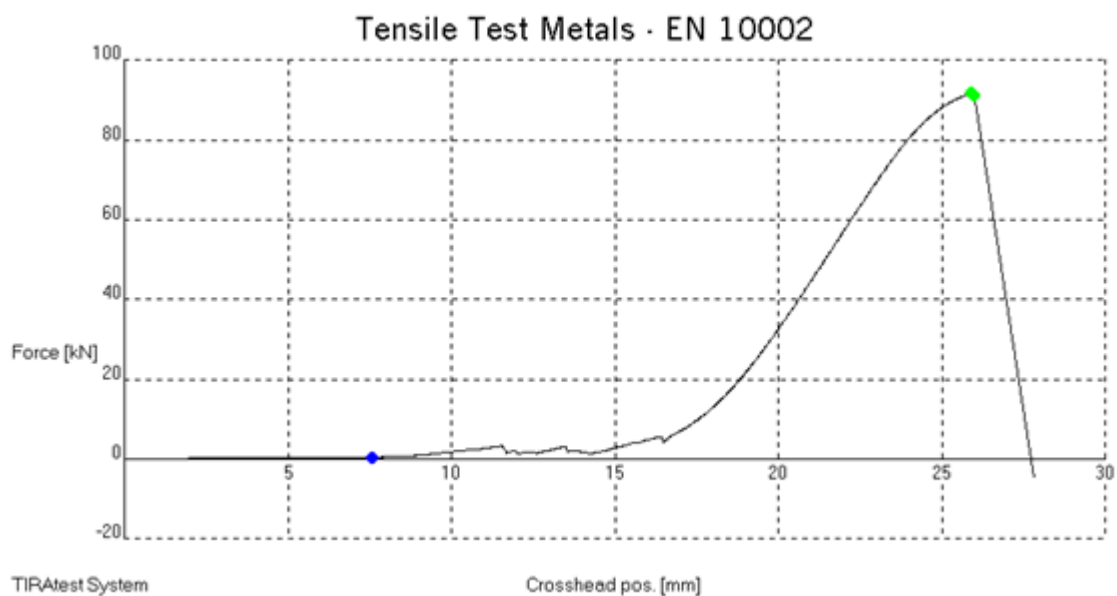
Slika 42. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak P5



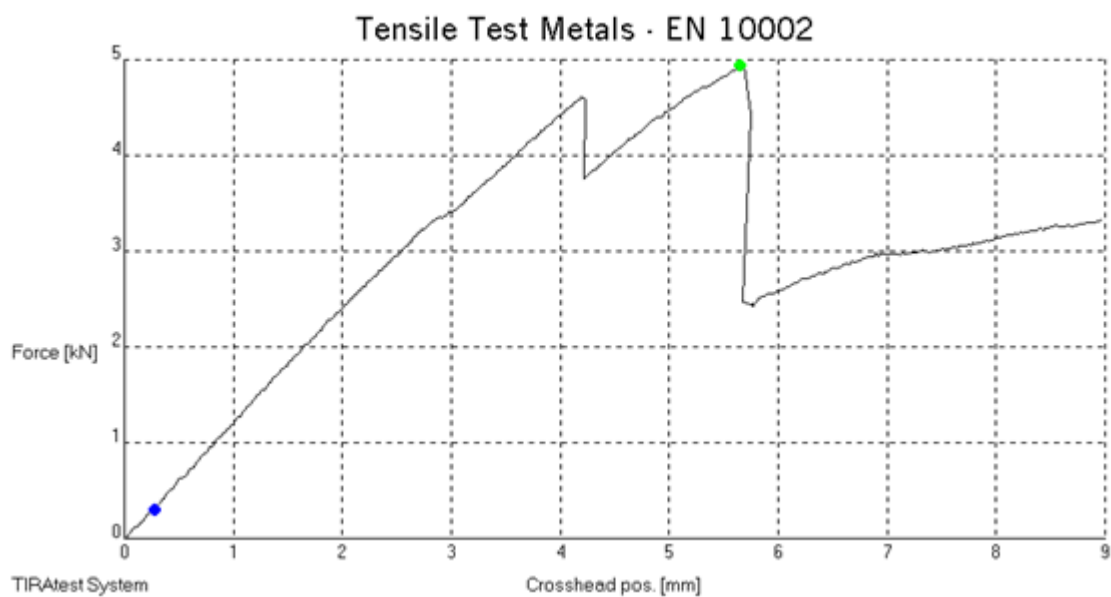
Slika 43. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak V3



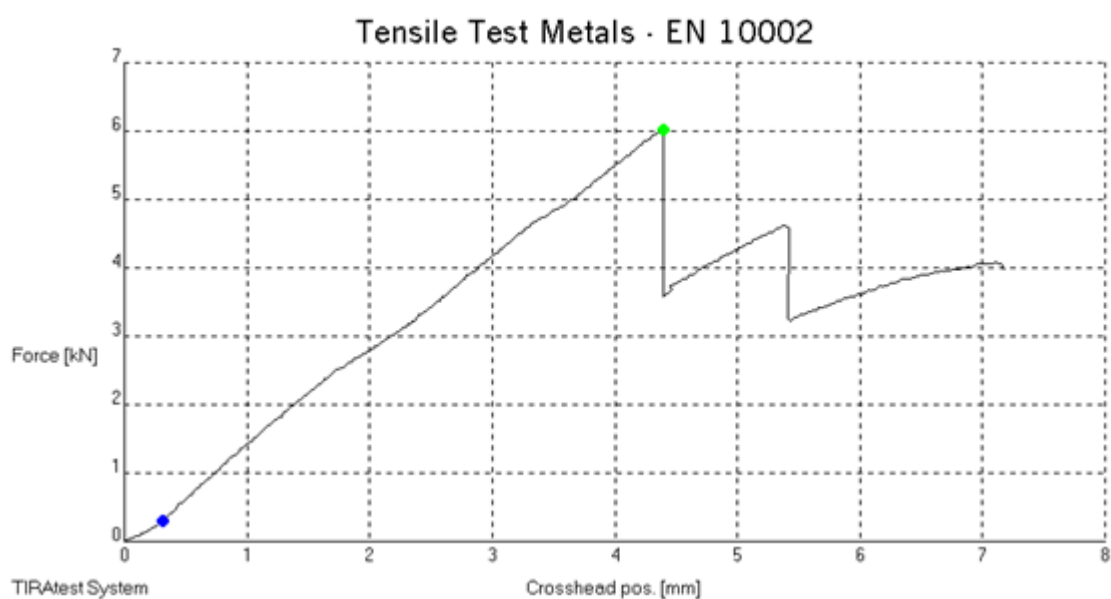
Slika 44. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak V4



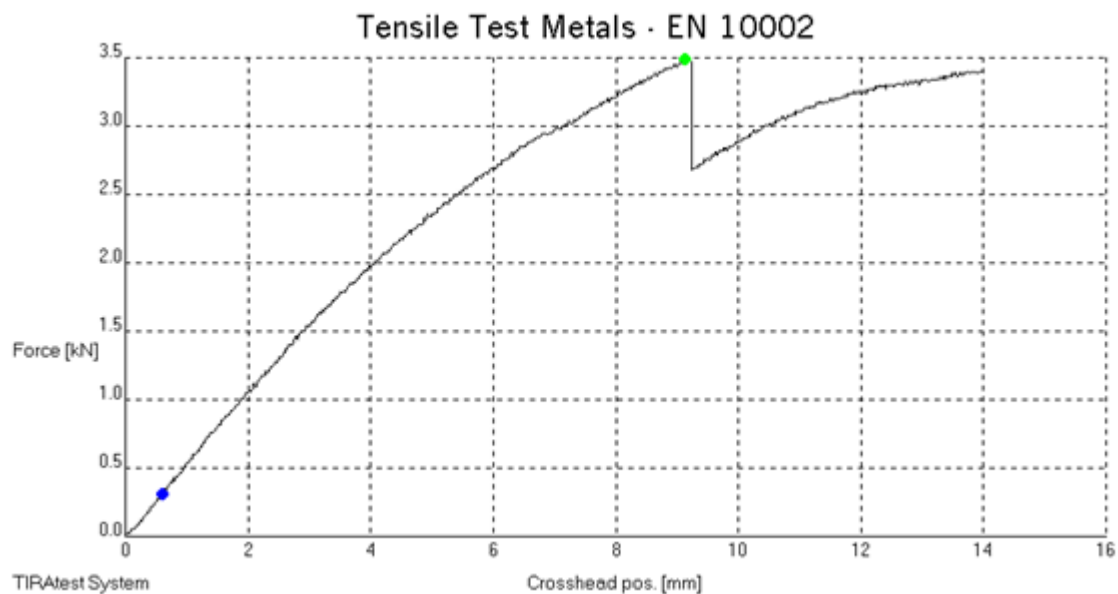
Slika 45. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak V5



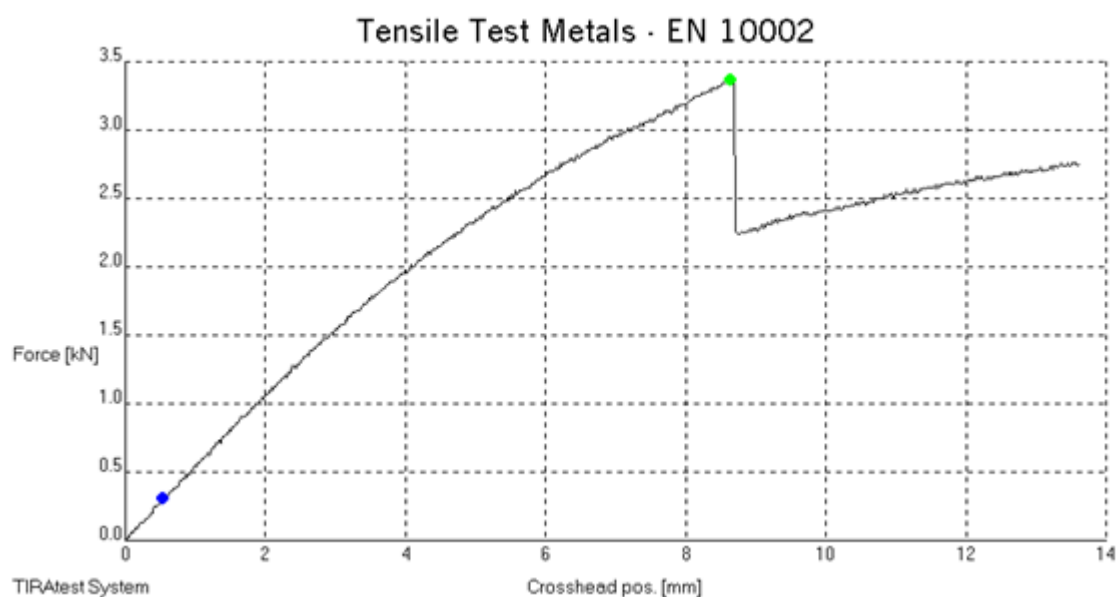
Slika 46. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak P2



Slika 47. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak P3



**Slika 48. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak V1**



**Slika 49. Dijagram ovisnosti progiba o opterećenju za uzorak V2**