

# SVOJSTVA I PRIMJENA KOMPOZITA S UGLJIČNIM VLAKNIMA

---

**Mateša, Karlo**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:550361>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-13**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
PROIZVODNO STROJARSTVO**

**KARLO MATEŠA**

**SVOJSTVA I PRIMJENA KOMPOZITA  
S UGLJIČNIM VLAKNIMA**

**ZAVRŠNI RAD**

**Karlovac, 2019.**

**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
PROIZVODNO STROJARSTVO**

**KARLO MATEŠA**

**SVOJSTVA I PRIMJENA KOMPOZITA  
S UGLJIČNIM VLAKNIMA**


**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Viši predavač:

Tihana Kostadin, mag. ing. stroj.

**KARLOVAC, 2019.**

	<b>VELEUČILIŠTE U KARLOVCU</b> Trg J.J.Strossmayera 9 HR - 47000, Karlovac, Croatia Tel. +385 - (0)47 - 843-500 Fax. +385 - (0)47 - 843-503 e-mail: dekanat @ vuka.hr	Klasa: 602-11/18-01/____	
	<b>ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA</b>	Ur.broj: 2133-61-04-18-01	

Ime i prezime	KARLO MATEŠA		
OIB / JMBG			
Adresa			
Tel. / Mob./e-mail	---		
Matični broj studenta	0110615041		
JMBAG	0248054670		
Studij (staviti znak X ispred odgovarajućeg studija)	<input checked="" type="checkbox"/> <b>Xpreddiplomski</b>	<input type="checkbox"/> specijalistički diplomski	
Naziv studija	STROJARSTVO		
Godina upisa	2015.		
Datum podnošenja molbe	11.06.2019.		
Vlastoručni potpis studenta/studentice			

Naslov teme na hrvatskom: SVOJSTVA I PRIMJENA KOMPOZITA S UGLJIČNIM VLAKNIMA	
Naslov teme na engleskom: CARBON FIBER COMPOSITES – PROPERTIES AND USE	
<p>Opis zadatka: Nakon uvoda, potrebno je u teorijskom dijelu opisati kompozitne materijale, sa posebnim naglaskom na ugljične kompozite. Zadatak eksperimentalnog dijela je ispitati svojstva kompozitnog materijala koji se sastoji od polimerne matrice i ugljičnih vlakana koji služe kao ojačanje. Analizirati rezultate. Na primjeru primjene ugljičnih kompozita u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji komentirati poboljšanja koja se dobiju zamjenom do sada korištenih materijala, kompozitom s ugljičnim vlaknima. Na kraju rada napisati zaključak. Završni rad urediti prema pravilima VUK.</p>	
Mentor:	Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

## **IZJAVA:**

Izjavljujem da sam ja – student Karlo Mateša, OIB: 60130486336, matični broj: 0248054670, upisan kao absolvent akademske godine 2018./2019., radio ovaj rad samostalno, koristeći se znanjem stečenim tijekom obrazovanja, te uz stručnu pomoć i vođenje mentorice Tihane Kostadin, mag.ing.stroj. , kod eksperimentalnog dijela u laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu Ane Tomašić struč.spec.ing.mech. te Denisa Kotarskog mag.ing.stroj. kojima se ovim putem zahvaljujem.

Karlo Mateša

U Karlovcu 26.6.2019

---

## **SAŽETAK**

### **SVOJSTVA I PRIMJENA KOMPOZITA S UGLJIČNIM VLAKNIMA**

Tema završnog rada je „Svojstva i primjena kompozita s ugljičnim vlaknima“. U radu su objašnjeni kompoziti, kompoziti sa polimernom matricom, detaljno objašnjeni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima i neki od postupaka izrade kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima. U eksperimentalnom dijelu zadatka analizom rezultata dobivenih ispitivanjem mehaničkih svojstava objašnjena su poboljšanja na primjeru primjene u automobilskoj industriji.

Ključne riječi: Ugljična vlakna, mehanička svojstva, automobilska industrija

## **SUMMARY**

### **CARBON FIBER COMPOSITES – PROPERTIES AND USE**

The theme of the final work is "Properties and Application of Carbon Fiber Composites". In this paper, composites, polymer matrix composites, carbon fiber reinforced composites and some of the carbon fiber reinforced composite compositions have been described. In the experimental part of the task, the analysis of the results obtained by examining the mechanical properties explained an improvement in the example of application in the automotive industry.

Keywords: Carbon fibers, mechanical properties, automotive industry

## Sadržaj

POPIS SLIKA .....	1
POPIS TABLICA .....	2
POPIS OZNAKA.....	3
1. UVOD.....	4
2. PODJELA KOMPOZITNIH MATERIJALA .....	6
2.1 Podjela kompozita prema vrsti matrice .....	6
2.1.1 Kompoziti s polimernom matricom ( PMC ).....	6
2.1.2 Kompoziti s metalnom matricom ( MMC ) .....	7
2.1.3 Kompoziti s keramičkom matricom ( CMC ).....	8
2.1.4 Ugljik – ugljik kompoziti ( CCC ) .....	9
2.2 Podjela kompozita prema obliku ojačala .....	10
2.2.1 Kompoziti ojačani česticama .....	11
2.2.3 Kompoziti ojačani vlaknima .....	13
2.3.1 Vlaknima ojačani polimerni kompoziti.....	15
2.3.2 Proizvodnja vlaknima ojačanih kompozita.....	17
2.3.2.1 Namotavanje.....	17
2.3.2.2 Lijevanje .....	18
2.3.2.3 Pultrudiranje.....	19
3. KOMPOZITI S UGLJIČNIM VLAKNIMA .....	20
3.1 Zahtjevi za visokom čvrstoćom.....	22
3.2 Zahtjevi za malom težinom .....	22
3.3 Proizvodnja ugljičnih vlakana.....	23
3.4 Odabir osnovne sirovine za ugljična vlaka .....	26
4. PRIMJENA KOMPOZITA S UGLJIČNIM VLAKNIMA .....	27
4.1 Ugljična vlakna u autoindustriji .....	27
4.2 Eksterijer automobila od ugljičnih kompozita .....	29
4.3 Interijer od ugljičnih kompozita .....	30
4.5 Primjena ugljičnih vlakana u svemirskoj industriji .....	33
4.6 Primjena ugljičnih vlakana u sportskoj industriji.....	33
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	34
5.1 Materijal .....	34
5.2 Epruvete .....	34
5.3 Oprema.....	35



5.4 Ispitivanje vlačne čvrstoće .....	38
5.5 Rezultati ispitivanja.....	42
5.6 Analiza rezultata .....	47
5.7 Primjer primjene polimernih kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima kod konstrukcije karoserije .....	48
6. ZAKLJUČAK.....	50
LITERATURA .....	51
POPIS PRILOGA .....	52

# POPIS SLIKA

Slika 1. Primjer podjele kompozita prema obliku ojačala .....	10
Slika 2. Primjer ojačavanja kompozita česticama .....	11
Slika 3. Primjer sendvič konstrukcije .....	12
Slika 4. Primjer kompozita ojačanih vlaknima .....	13
Slika 5. Primjer različite orijentacije vlakana .....	14
Slika 6. Mehanička svojstva vlaknastih ojačanja .....	16
Slika 7. Specifična čvrstoća (čvrstoća/gustoća) i specifična krutost (modul elastičnosti/gustoća) kompozitnih materijala u usporedbi s metalnim materijalima .....	16
Slika 8. Proizvodnja kompozita procesom namatanja .....	18
Slika 9. Proizvodnja kompozita procesom pultrudiranja .....	19
Slika 10. Shematski prikaz procesa proizvodnje ugljičnih vlakana na bazi poliakrilonitrila (pan) .....	23
Slika 11. Kemijski spoj poliakrilonitrila kao osnovne sirovine za proizvodnju karbonskih vlakana .....	24
Slika 12. Usporedni prikaz postupka proizvodnje ugljikovih vlakana iz katrana i PAN-a .....	25
Slika 13. Pletena tkanina od karbonskih vlakana .....	28
Slika 14. Ford gt carbon series .....	29
Slika 15. Primjer školjke sjedala od staklenih vlakana .....	30
Slika 16. Paneli vrata načinjeni od plastomerne matrice ojačane ugljikovim vlaknima .....	31
Slika 17. Prikaz upotrebe ugljičnih vlakana kod Airbus-a A380 .....	32
Slika 18. Epruveta izrađena standardom DIN 50 125 .....	34
Slika 19. Kidalica SHIMADZU AG-X .....	36
Slika 20. Stolna glodalica .....	37
Slika 21. Epruvete pripremljene za ispitivanje vlačne čvrstoće .....	39
Slika 22. Epruveta postavljena u kidalicu .....	40
Slika 23. Epruvete od ugljičnih vlakana nakon provedenog ispitivanja .....	42
Slika 24. Dijagram sila / produljenje za epruvetu 1 .....	43
Slika 25. Dijagram sila / produljenje za epruvetu 2 .....	44
Slika 26. Dijagram sila / produljenje za epruvetu 3 .....	44
Slika 27. Dijagram sila / produljenje za epruvetu 4 .....	45
Slika 28. Dijagram sila / produljenje za epruvetu 5 .....	46
Slika 29. Dijagram sila / produljenje .....	47
Slika 30. Karoserija od Lexus LFA .....	49

# POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba troškova i mehaničkih svojstava .....	21
Tablica 2. Rezultati ispitivanja .....	43

## POPIS OZNAKA

PMC - kompozit s polimernom matricom

CMC - kompozit s keramičkom matricom

MMC - kompoziti s metalnom matricom

CCC - ugljik - ugljik kompozit

PA - poliamid

PE - polietilen

PP – polipropilen

Rm – vlačna čvrstoća [ N/mm<sup>2</sup> ]

Fm – maksimalna sila [ N ]

So – površina početnog poprečnog presjeka [ mm<sup>2</sup> ]

Fk - konačna sila [ N ]

$\Delta L_u$  – produljenje [ mm ]

Lo – početna duljina epruvete [ mm ]

# 1. UVOD

Općenito govoreći svaki materijal koji se sastoji od dvije ili više komponenti različitih svojstava i jasne granice između komponenti može se nazivati kompozitni materijal. Dobiveni materijal ima svojstva koja se razlikuju od pojedinačnih komponenti. Poboľšana su svojstva poput specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti, lomne žilavosti, toplinske postojanosti. Dakle kompoziti su umjetno proizvedeni višefazni materijali koji imaju željenu kombinaciju najboljih svojstava konstitutivnih faza. Obično, jedna faza ( matrica ) je kontinuirana i okružuje ostale ( disperzirane faze ). [1]

Kompozitni materijali su dobiveni spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Kompoziti mogu biti: metalno – metalni , metalno – keramički, metalno – polimerni, keramičko – polimerni, keramičko – keramički, polimerno – polimerni, polimerno – metalni. [1]

Upravo navedeno vodi nas do temeljne podjele kompozita na metalne, keramičke i polimerne kompozite. Kod toga se pretpostavlja da su metali, keramika, odnosno polimeri osnova kojoj se pridodaju najrazličitiji dodaci u cilju modificiranja svojstava matrice, odnosno postizanja cilja koji je naveden u definiciji – da se dobije materijal svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. [1]

Kompozitni materijali se primjenjuju u:

- Automobilskoj industriju,
- Zrakoplovnoj industriju,
- Vojnoj industriju,
- Kirurgiji,
- Stomatologiji,
- Svemirskim istraživanjima.

Neke od prednosti kompozitnih materijala su:

- Otpornost na koroziju,
- Mala gustoća i mala masa,
- Povoljan odnos čvrstoće i gustoće ( specifična čvrstoća ),
- Mogućnost proizvodnje dijelova složenog oblika,
- Dulji vijek trajanja.

Kao i svaki materijal i kompoziti imaju svoje nedostatke. Krhkiji su od konvencionalnih materijala i zbog toga se lakše oštete. Kompoziti su relativno novi materijali čija je cijena izrazito visoka zbog troškova proizvodnje, te njihova cijena konstantno raste. Isto tako kompozitni materijali zahtijevaju mnogo kompleksniju strukturu sa aspekta mehaničkih svojstava što nije slučaj i kod struktura izrađenih od metala i sličnih materijala. [5]

## 2. PODJELA KOMPOZITNIH MATERIJALA

Svaki kompozitni materijal u osnovi se sastoji od dvije faze – kontinuirane faze ( matrični materijal ), i dodatka, koji najčešće ima funkciju ojačala i obje faze su međusobno povezane. Pojedine faze su uglavnom nemetali, ali mogu biti i metali, kemijski i intermetalni spojevi. Matrica i dodaci imaju bitno različita mehanička svojstva. Dok su matrice mekše i služe kao punilo za postizanje stabilnosti oblika tvrde faze, dodatak je u manjoj količini čvrsta i tvrda faza, a to su uglavnom vlakna i čestice. Ojačala se povezuju preko matrice, to je ujedno i osnovna zadaća matrice. Točnije, zadaća matrice je da prenosi opterećenja na ojačala i osigurava zaštitu od površinskog oštećenja. Uloga ojačala je da da bude nosivi element kompozita, odnosno kompozitu daje pojedina svojstva: visoki modul elastičnosti – krutost, otpornost kompozita na trošenje, toplinska vodljivost te visoka čvrstoća kompozita. Ponašanje kompozita očituje se u svojstvima materijala matrice i pojačala, veličinom i raspodjelom konstituenata, volumnom udjelu, njegovim oblikom, te prirodom i jakošću veza između konstituenata. [1]

### 2.1 Podjela kompozita prema vrsti matrice

Podjela kompozita prema vrsti matrice se razlikuje, prvenstveno jer se kompozitni materijali vrlo brzo razvijaju, pa se prema tome razvijaju nove podijele. Prema tome danas se uglavnom primjenjuju podijele na četiri vrste.

- Kompoziti s polimernom matricom ( PMC ),
- Kompoziti s metalnom matricom ( MMC ),
- Kompoziti s keramičkom matricom ( CMC ),
- Ugljik – ugljik kompoziti ( CCC ).

#### 2.1.1 Kompoziti s polimernom matricom ( PMC )

Postoje dvije vrste polimernih matrica: plastomerne i duromerne. Najpoznatiji predstavnik duromerne matrice su poliesterske smole dobivene kondenzacijom organske kiseline i dialkohola. Također još postoje i epoksidne, vinil esterske, fenol smole itd. Od plastičnih matrica najpoznatija je polipropilenska matrica ( PP ), dok još postoje i poliamidne ( PA ), polietilen ( PE ), polikarbonatne i dr. [2]

## Svojstva kompozita s polimernom matricom

- Dobra žilavost,
- Dobra obradljivost,
- Izuzetna korozijska postojanost,
- Visoki omjer čvrstoća / masa. [2]

### 2.1.2 Kompoziti s metalnom matricom ( MMC )

Visoka gustoća i složenost proizvodnje koja traži visoke temperature su neki od osnovnih nedostataka MMC kompozita. Stoga su matrice najčešće od slitine aluminija, titana i magnezija. Tijekom proizvodnje postoji opasnost kemijskih reakcija između ojačala i matrice pa se primjenjuje difuzijsko spajanje pri visokim tlakovima i temperaturama ispod tališta. U metalnoj osnovi nalazi se sitno dispergirana nemetalna faza u obliku čestica ili vlakna. Za veće radne temperature ojačala su u obliku: vlakna i viskera. [2]

## Svojstva kompozita s metalnom matricom

- Vrlo visoka specifična čvrstoća i specifična krutost,
- Visoka toplinska i električna vodljivost i niska toplinska rastezljivost,
- Vrlo dobra otpornost na trošenje,
- Vrlo dobra mehanička svojstva pri visokim temperaturama. [2]



### 2.1.3 Kompoziti s keramičkom matricom ( CMC )

CMC se primjenjuju u uvjetima koji zahtijevaju postojanost kompozita pri vrlo visokim temperaturama. Zbog krhkosti, krutosti i visoke tlačne čvrstoće keramička matrica se ponaša drugačije od žilavih polimernih i metalnih matrica. Žilavost keramičkom kompozitu povisuju vlakna na taj način što se energija za širenje pukotine troši za lomljenje, odvajanje i izvlačenje vlakana iz matrice. Što su vlakna tanja i mrežna struktura bolje projektirana 3 – D tkanje to se može očekivati ukupno bolja mehanička otpornost. Njihova niska gustoća i toplinska vodljivost čini ih atraktivnim za primjenu u toplinskim strojevima, zrakoplovnim i svemirskim uređajima kada su ovi izvrgnuti visokim temperaturama. [2]

#### Svojstva kompozita s keramičkom matricom

- Stabilnost pri ekstremno visokim temperaturama,
- Postojanost na toplinske šokove,
- Iznimna postojanost na koroziju,
- Visoka tvrdoća i otpornost na trošenje,
- Mala masa.

## 2.1.4 Ugljik – ugljik kompoziti ( CCC )

Ugljično-grafitni materijali mogu se koristiti za posebne namjene u obliku ugljik-ugljik kompozita. Ovaj materijal je kao "ugljična stakloplastika." Matrica je ugljik-grafit, a pojačanja su karbonska vlakna, isti ona koja se koriste kako bi pojačali polimernu matricu kompozita. Ovi kompoziti koriste se za primjene koje zahtijevaju malu težinu, a visoku otpornost na temperature. U radnim uvjetima sa visokim temperaturama ( $> 3600 \text{ }^\circ \text{C}$ ) ugljik ima veću čvrstoću od bilo kojeg poznatog konstrukcijskog materijala. Zrak nije prikladan radni okoliš za ugljično-grafitne proizvode, jer na temperaturama iznad  $600 \text{ }^\circ \text{C}$ , na zraku, gore. Oksidacijom ugljik-ugljik kompozita rade se zaštitni premazi na keramici.

Ugljik-ugljik kompoziti koriste se za izradu nosa i bridova krila na space shuttle i na konstrukcijama kao što su kočione obloge za velike zrakoplove. Ovi materijali su vrlo skupi, tako da se ne koriste za obične primjene. [3]

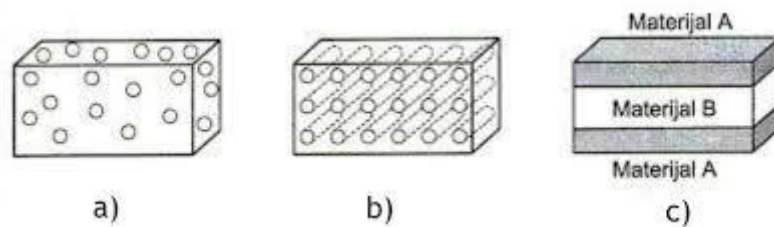
### Svojstva ugljik – ugljik kompozita

- Visoki rastezni modul elastičnosti,
- Visoka rastezna čvrstoća, ne mijenja se ni pri temperaturi višoj od  $2000^\circ\text{C}$ ,
- Otpornost na puzanje,
- Relativno visoka žilavost,
- Niska toplinska rastezljivost, mala osjetljivost prema toplinskom šoku,
- Visoka toplinska vodljivost. [2]

## 2.2 Podjela kompozita prema obliku ojačala

Druga vrsta podjele kompozitnih materijala odnosi se na oblik ojačavala koji se nalazi unutar matrice kompozita. Osnovna podjela kompozita prema obliku ojačala.

- Kompoziti ojačani česticama ( a )
- Strukturni kompoziti ( c )
- Kompoziti ojačani vlaknima ( b )



*Slika 1. Primjer podjele kompozita prema obliku ojačala*

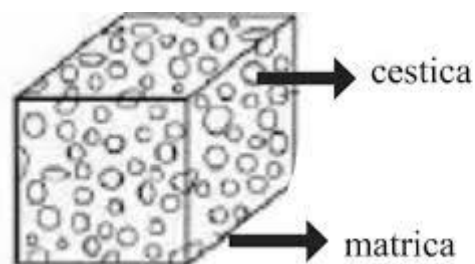
[1]

## 2.2.1 Kompoziti ojačani česticama

Kompoziti ojačani česticama sadrže matricu u koju su ugrađena ojačala u obliku diskretnih, jednoliko raspoređenih tvrdih i krhkih čestica. Razlikuju se kompoziti s velikim česticama te kompoziti s disperzijom, to jest ojačani vrlo malim česticama (10 do 250 nm, volumni udjel do 15%), koje povećavaju čvrstoću usporavanjem gibanja dislokacija u materijalu. Primjeri su kompozita ojačanih česticama: beton (koji se može dodatno ojačati armiranjem), abrazivne paste za poliranje, tvrdi metali, čađom ojačana guma za pneumatike i drugo.[2]

Čestice su tvrde i krhke - oksidi, nitridi i karbidi npr.:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC, BN,  $\text{ZrO}_2$ , TiC,  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ , WC,  $\text{B}_4\text{C}$  itd.

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



Slika 2. Primjer ojačavanja kompozita česticama

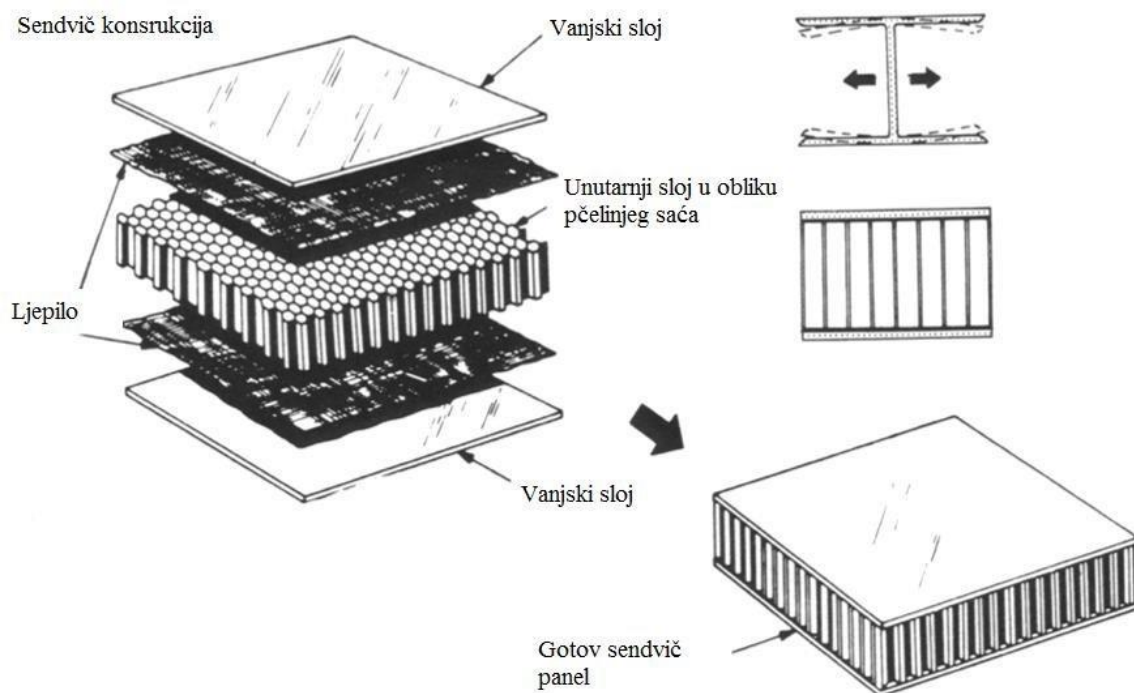
[4]

## 2.2.2 Strukturni kompoziti

Strukturni kompoziti se uobičajeno sastoje od homogenog i kompozitnog materijala, a njihova konačna svojstva ne ovise samo o svojstvima materijala koji čine kompozit, nego i o geometrijskom dizajnu različitih strukturnih elemenata. Dvije najčešće grupe koje se pojavljuju unutar strukturnih kompozita su laminati i sendvič konstrukcije. [1]

Laminati se mogu opisati kao materijali koji se sastoje od slojeva materijala povezanih u cjelinu. Broj slojeva varira od dva na više ovisno o tome kakva svojstva želimo postići. Vrlo je bitna i orijentacija slojeva, tu se iskorištava mogućnost povezivanja većeg broja slojeva materijala koji su različito orijentirani jedan prema drugome, što za posljedicu daje materijal s poboljšanim svojstvima u više smjerova. [1]

Sendvič paneli su vrsta strukturnih kompozita koji se sastoje od dva vanjska sloja više čvrstoće i manje debljine, unutar kojih se nalazi deblji sloj materijala manje gustoće (jezgra). Vanjski slojevi nose veći dio površinskih opterećenja i opterećenje izazvano poprečnim savijanjem. Dok jezgra služi za razdvajanje vanjskih slojeva i pruža deformacijsku otpornost, te daje određenu smičnu čvrstoću duž ravnine. [1]



Slika 3. Primjer sendvič konstrukcije

[6]

### 2.2.3 Kompoziti ojačani vlaknima

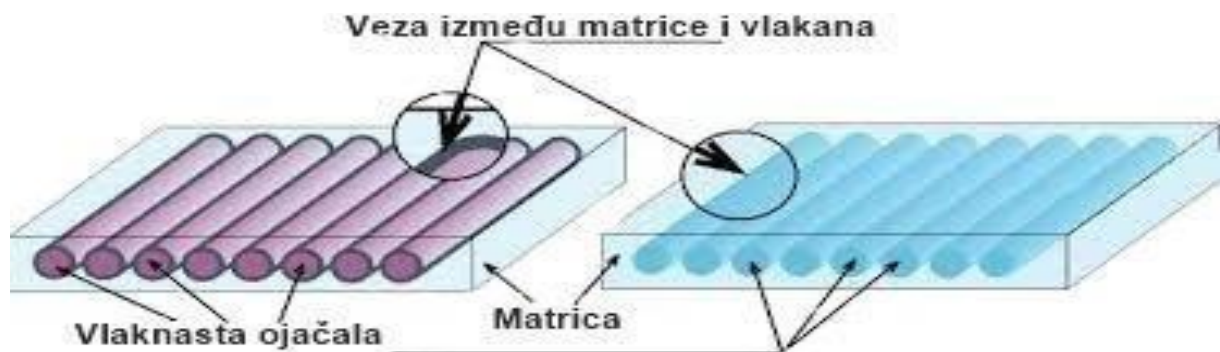
Kompoziti s vlaknima sadrže vlaknasta ojačala koja mogu biti u obliku viskera (vrlo tanke niti keramičkih monokristala visoke čistoće s velikom omjerom duljina/promjer), vlakana i žica (tipični materijali: čelik, molibden i volfram). Omjer ojačala u obliku viskera ide u rasponu od 20 do 1.000. Male dimenzije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

Usprkos visokoj čvrstoći, viskeri se ne primjenjuju u većoj mjeri budući da su zbog kompleksnih postupaka proizvodnje izuzetno skupi. Štoviše, često je gotovo nemoguće viskere ugraditi u matricu. [7]

Vlakna su fine niti materije promjera obično manjeg od  $10^{-6}\text{m}$ , a mogu biti polikristalna ili amorfna. Daleko su čvršća i tvrđa od bilo koje drugog oblika iste tvari. Postoje kontinuirana i diskontinuirana vlakna. Kontinuirana vlakna koja vode do najboljih svojstva često se teško proizvode i teško ugrađuju u matricu. [7]

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

Po rasponu omjera duljine i promjera razlikuju se kratka vlakna i duga. Kod kratkih vlakana odnos između duljine i promjera iznosi otprilike 100, a kod dugačkih je virtualno beskonačan.

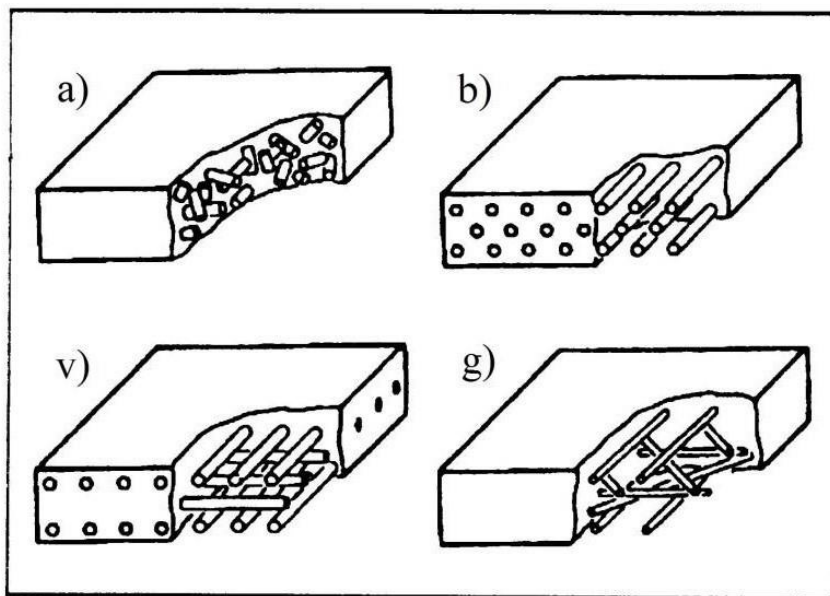


Slika 4. Primjer kompozita ojačanih vlaknima

[8]

Svojstva kompozita ojačanih vlaknima ovise o :

- omjer duljina/promjer vlakana,
- volumnom udjelu vlakana,
- usmjerenosti vlakana,
- svojstvima vlakana,
- svojstvima matrice.



Različita vlakna:

- a) kratka, slučajno orijentirana
- b) duga, u jednom smjeru
- c) duga, međusobno okomito orijentirana
- d) duga, isprepletana, slučajno orijentirana

*Slika 5. Primjer različite orijentacije vlakana*

[9]

### 2.3.1 Vlaknima ojačani polimerni kompoziti

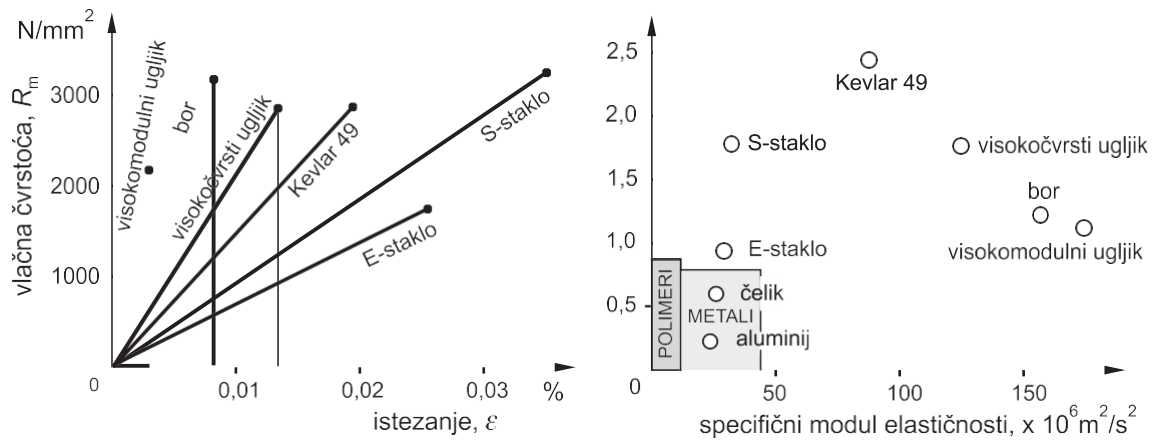
Prvi predstavnici kompozita bili su, upravo, polimerni kompoziti, točnije, polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima koji su se početno rabili za manje opterećene dijelove zrakoplova. Polimerni kompoziti sačinjeni su od polimerne smole kao matrice i ojačala, uglavnom u obliku vlakana. Tipično sadrže čvrsta, kruta i krhka vlakna u mekanijoj, duktilnoj i žilavoj polimernoj smoli. Vrlo česti kompoziti staklenog i ugljičnog ojačanja sadrže kruta i čvrsta, ali i krhka vlakna ugrađena u polimernu matricu, koja sama po sebi nije osobito ni kruta niti čvrsta. [7]

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

Općenito vlakna mogu biti:

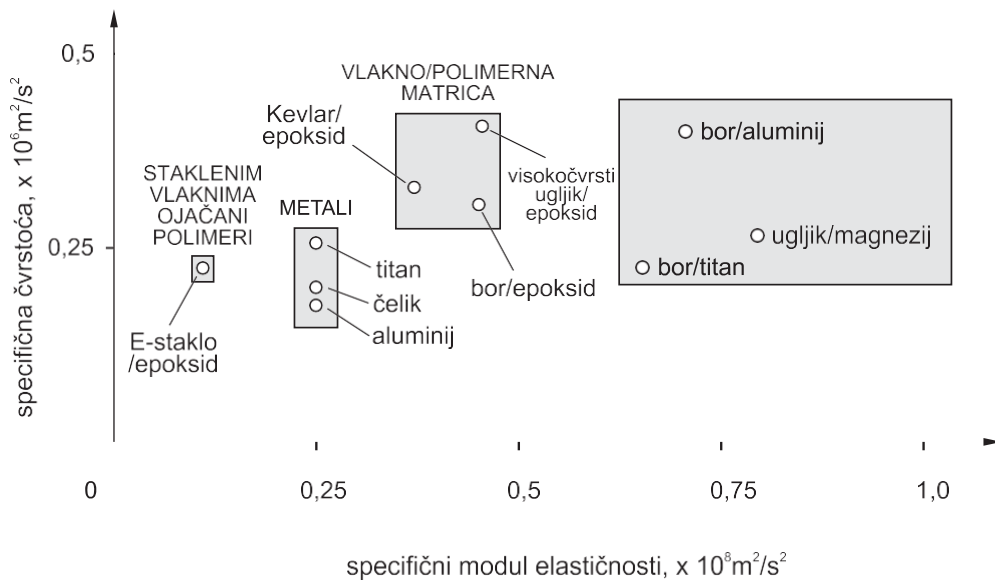
- Prirodna vlakna (pamuk, sisal, lan, itd.),
- Staklena vlakna (E-staklo, S-staklo, R-staklo),
- Poliesterska vlakna (Dacron, Terilen, itd.),
- Aramidna vlakna (Kevlar, Twaron, itd.),
- Ugljična vlakna (Carbon).





Slika 6. Mehanička svojstva vlaknastih ojačanja

[10]



Slika 7. Specifična čvrstoća (čvrstoća/gustoća) i specifična krutost (modul elastičnosti/gustoća) kompozitnih materijala u usporedbi s metalnim materijalima

[10]

## 2.3.2 Proizvodnja vlaknima ojačanih kompozita

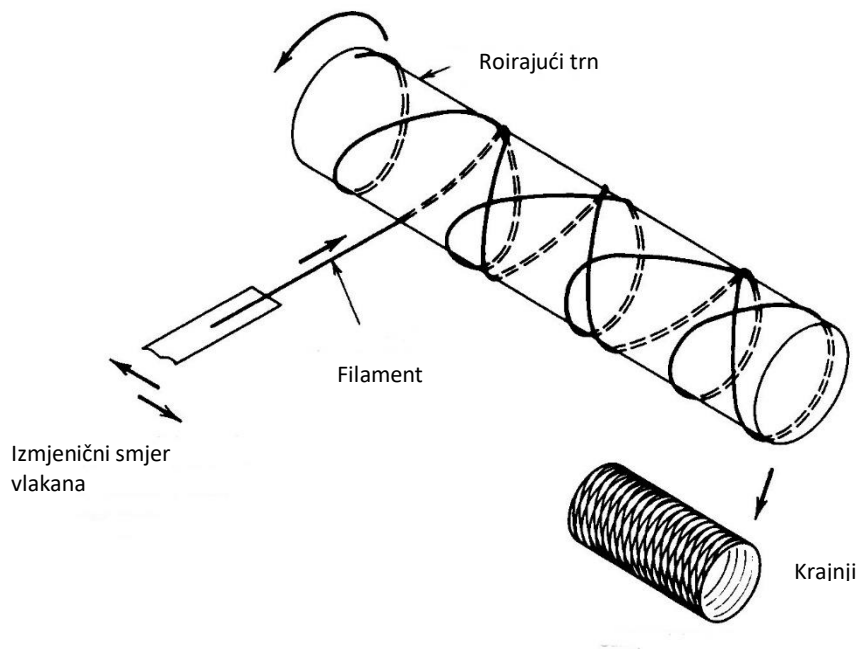
Postoje razni postupci kojim se vlakna mogu vezati za kompozit. U sljedećem poglavlju će se opisati i objasniti najčešći postupci a to su: namotavanje, lijevanje i pultrudiranje.

### 2.3.2.1 Namotavanje

Namotavanje (engl. filament winding) je postupak pri kojem se kontinuirana vlakna koja služe kao ojačalo namotavaju na model, koji obično bude cilindrični, tako da se oblikuju i stvore šuplji dio. Ovisno o tome prolaze li vlakna kroz smolu prije namotavanja ili se upotrebljavaju vlakna preprega razlikuje se mokro i suho namotavanje. Kod suhog namotavanja, namotavaju se preprezi koji su namotani na svitke. Oni se namotavaju bez prethodnog prolaska kroz kupku smole. Namotavanje preprega daje dobra svojstva kompozita i lako kontroliranje postupka. Nedostaci preprega su viša cijena i potreba za posebnim uvjetima skladištenja kako ne bi došlo do prijevremenog umrežavanja. Ti preprezi sadrže dodatke poput otapala i dodataka za konzerviranje koji održavaju pred umreženo stanje. Mokro namotavanje češće se primjenjuje od suhog. U tom slučaju vlakna prije namotavanja prolaze kroz kupku smole ili valjke natopljene smolom. Kako bi se povećala viskoznost smole, odnosno vlaženje vlakana, kupka smole se grije. Kontrola nanošenog sloja smole je otežana, a udio smole ovisi o viskoznosti, vlaženju, brzini namotavanja, te naprežanju vlakana. Taj postupak jeftiniji je od suhog namotavanja, ali ga nije lako kontrolirati. [5]

Prednosti proizvodnje vlaknima ojačanih kompozita namotavanjem:

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



*Slika 8. Proizvodnja kompozita procesom namatanja*

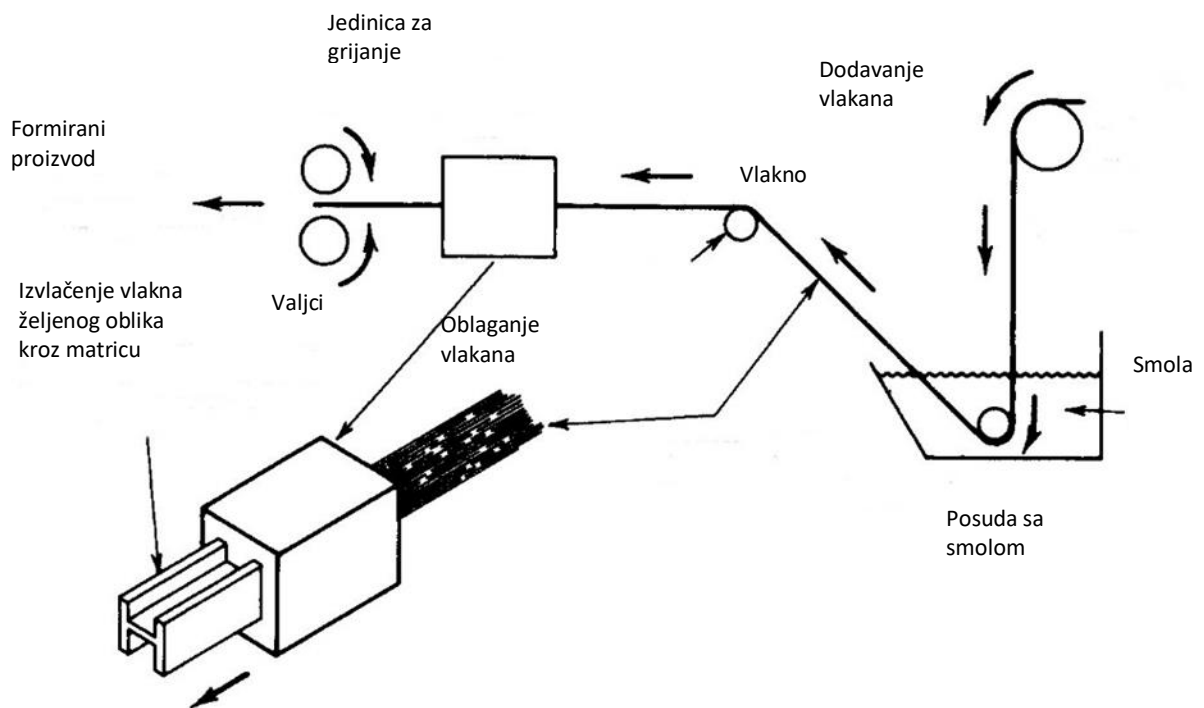
[12]

### 2.3.2.2 Lijevanje

Polimerni kompoziti mogu se proizvesti različitim postupcima lijevanja. Ovisno o načinu kako se kapljevina polimerne smole unosi među vlakna, razlikuje se kapilarno djelovanje, tlačno lijevanje, vakuumsko infiltriranje ili kontinuirano lijevanje. Postoji poznati način lijevanja zvan RTM postupak (engl. Resin Transfer Moulding). Takav postupak se provodi na slijedeći način: polimerna smola ulijeva se pod tlakom u šupljinu kalupa i raspoređuje oko ojačala, a nakon polimerizacije potaknute zagrijavanjem, kalup se uklanja i dobiva izradak gotovog oblika. [5]

### 2.3.2.3 Pultrudiranje

Snop kontinuiranih vlakna prethodno impregniran (natopljen) duromernom smolom provlači se kroz alat odgovarajućeg oblika i nakon toga slijedi otvrdnjavanje čime se dobiva konačan oblik. Primjenom odgovarajućih alata mogu se proizvesti cijevi, šuplji elementi ili različiti drugi proizvodi konstantnog oblika. Glavna ojačala su staklena, ugljična te armidna vlakna uobičajenih udjela od 40-70% volumnog udjela. [5]



Slika 9. Proizvodnja kompozita procesom pultrudiranja

[12]

### 3. KOMPOZITI S UGLJIČNIM VLAKNIMA

Grafitni odnosno ugljični kompoziti imaju izuzetna mehanička svojstva, neusporediva sa drugim materijalima. Materijal je jak, tvrd i lagan. Kompozitni grafit je materijal izbora za primjenu u uvjetima gdje se zahtjeva lagan materijal visokih performansi, kao što su komponente letjelica, borbenih zrakoplova i trkaćih automobila. Kompozitni materijali su građeni od kombinacije očvršćenja (vlakana) i matrice (smole), ovakve kombinacije vlakana i matrica omogućavaju značajke materijala koje su superiorne u odnosu na bilo koji od nekompozitnih materijala. U kompozitnom materijalu, vlakna nose većinu opterećenja, te su glavna odrednica svojstva materijala. Smola olakšava prijenos opterećenja između vlakana, sprečava izvijanje vlakna i spaja materijal. [3]

Grafitna vlakna (ponekad se nazivaju karbonska vlakna) su izrađena od organskog polimera kao što je poliakrilonitril. Materijal je izdužen u vlakna i grije se pod opterećenjem na visoku temperaturu (> 1000C). Dvodimenzionalni kristali ugljik-ugljik (grafit) se formiraju kada se eliminira vodik. Lanac ugljik-ugljik ima izuzetno jake molekularne veze (dijamant je trodimenzionalni ugljik-ugljik kristal), a to je ono što daje vlakna vrhunskih mehaničkih svojstava. [3]

Povijesno gledano, ugljični kompoziti su vrlo skupi, što ograničava njegovu uporabu samo za posebne namjene. Međutim, u proteklih petnaestak godina, proizvodni proces je poboljšán, a proizvodnja povećana pa se cijena ugljičnih kompozita stalno snižava. Danas je primjena ugljičnih kompozita ekonomski održiva za razne namjene, kao što su sportska oprema, dijelovi plovila, vozila i industrijski strojevi visokih performansi. [3]

Tablica 1. Usporedba troškova i mehaničkih svojstava

Svojstvo	Grafitni kompoziti (najviši razred)	Grafitni kompoziti (komercijalni razred)	Kompoziti sa staklenim vlaknima	Aluminij 6061 T-6	Čelik
Cijena, €/kg	40..500+	10..40	3..6	6	0.60
Čvrstoća, MPa	620..1380	345..620	138..241	241	414
Elastičnost, MPa	$69 \times 10^6$ .. $345 \times 10^6$	$55 \times 10^6$ .. $69 \times 10^6$	$7 \times 10^6$ .. $10.5 \times 10^6$	$69 \times 10^6$	$210 \times 10^6$
Gustoća, g/cm <sup>3</sup>	1.39	1.39	1.53	2.78	7.8
Spec. čvrstoća	$446 \times 10^6$ .. $992 \times 10^6$	$248 \times 10^6$ .. $446 \times 10^6$	$90 \times 10^6$ .. $157 \times 10^6$	$86 \times 10^6$	$53 \times 10^6$
Specif. elastičnost	$50 \times 10^6$ .. $248 \times 10^6$	$39 \times 10^6$ .. $50 \times 10^6$	$4.5 \times 10^6$ .. $6.7 \times 10^6$	$25 \times 10^6$	$27 \times 10^6$
CTE, m/m/°C	$-1.8 \times 10^{-6}$ .. $1.8 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-6}$ .. $3.6 \times 10^{-6}$	$11 \times 10^{-6}$ .. $14 \times 10^{-6}$	$23 \times 10^{-6}$	$12.6 \times 10^{-6}$

[13]

### 3.1 Zahtjevi za visokom čvrstoćom

Ugljični kompoziti su idealno rješenje za primjene gdje je potrebna visoka čvrstoća i mala težina. [3]

Primjeri:

- građa letjelica,
- građa zrakoplova,
- osovine za kamione i vozila,
- valjci kod strojeva,
- jarboli jedrilica,
- okviri za bicikle,
- komponente za strojeve koje rade sa velikim brzinama, a zahtijevaju visoku preciznost.

### 3.2 Zahtjevi za malom težinom

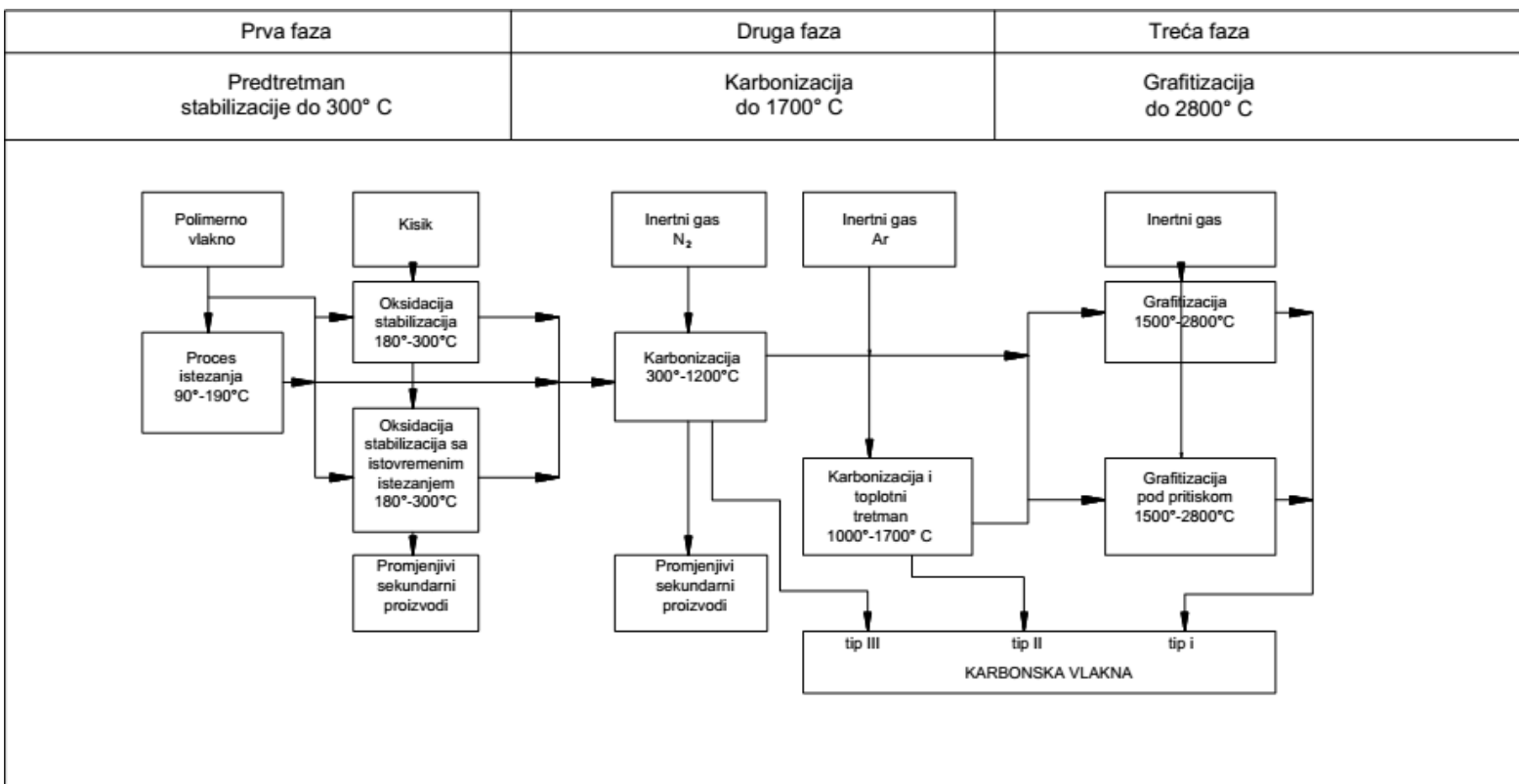
Ugljični kompoziti su puno koriste za lagane strukture koje će biti izložene vrlo visokim opterećenjima. [3]

Primjeri:

- dijelovi za motocikle,
- štapovi za pecanje,
- građa zrakoplova,
- satelitske antene,
- šasije trkaćih automobile.

### 3.3 Proizvodnja ugljičnih vlakana

Ubrzani razvoj tehnologije pratio je proizvodnju karbonskih vlakana od početka 90-ih godina prošlog stoljeća. Međutim i dalje se koriste tri osnovna načina proizvodnje ugljičnih vlakana, ugljična vlakna na bazi celuloze (rayon), ugljična vlakna na bazi poliakrilonitrila (pan), i ugljična vlakna na bazi katrana (pitch). Proces proizvodnje ovisi o vrsti sirovine. Međutim, osnovni procesi prilikom proizvodnje su: oksidacija, stabilizacija, karbonizacija, grafitizacija i površinska toplinska obrada. [14]



Slika 10. Shematski prikaz procesa proizvodnje ugljičnih vlakana na bazi poliakrilonitrila (pan)

[14]



Nakon stabilizacije polimernih vlakana dolazi do naglog porasta temperature u procesu, pri čemu poliakrilonitrilna vlakna prolaze iz linearnog u ciklički oblik prikazan na Slici 2. Ciklički oblik je vrlo složen, ali u ovom dijelu još uvijek ne dobivamo čista ugljična vlakna. Tek nakon povećanje temperature preko 1600 ° C dodatkom dušikovog oksida, kasnije i argona dobiva se čisti filtrirani ugljik.

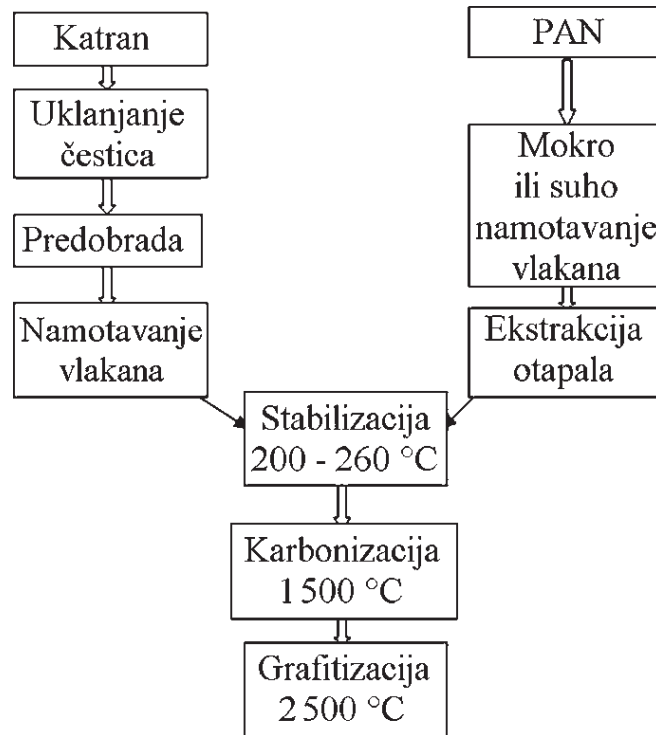


Slika 11. Kemijski spoj poliakrilonitrila kao osnovne sirovine za proizvodnju karbonskih vlakana

[15]

Kvaliteta materijala ovisit će o broju vlakana u svežnju neupletenih vlakana (e. tow). Za najbolje karakteristike materijala koje zahtijeva vrhunski tehnički proizvod kao što je proizvodnja svemirskih letjelica upotrebljavaju se svežnjevi s 3 000 i 12 000 vlakana, dok za konvencionalnu primjenu sadržavaju do 320 000 vlakana. Materijal je jeftiniji ako ima više vlakana. Svežnjevi vlakana dobiveni iz katrana sadržavaju 2 000 – 4 000 vlakana, većeg promjera (10 – 15 μm) od onih dobivenih od PAN-a. PAN vlakna starija su i više su prekidne čvrstoće, zbog čega se mnogo više upotrebljavaju. [16]

Iako se odlikuju mnogim dobrim svojstvima, ugljikova vlakna imaju nisku pritisnu čvrstoću, krtoš i nisu otporna na abraziju. Da se doskoči tim problemima, ugrađuju se kao ojačavala u duromernu matricu. Funkcija matrice je da podupire i razdvaja vlakna, štiti ih od okoliša i prenosi naprezanje. Druga je mogućnost upotreba slojeva tkanine od ugljikovih vlakana u sendvič konstrukcijama povezanih duromernom smolom. Svježe proizvedeno ugljikovo vlakno slabo prianja na polimernu matricu. Povezivanje se povećava površinskom oksidacijskom obradom. Oksidacija jetka površinu, čisti je te stvara polarne hidrofilne skupine koje sadržavaju kisik. Proces se provodi u kapljevitoj ili plinovitoj sredini (CO<sub>2</sub>, Cl, NO<sub>2</sub>-NO, plazma). Stvorene polarne kisik-ugljik veze na površini vlakna mogu međudjelovati sa smolom (matricom). Da bi se sačuvala reaktivnost površine vlakana, vlakna se prevlače tankim slojem buduće matrice, koji ujedno štiti vlakna tijekom transporta i daljnje prerade. [17], [18]



Slika 12. Usporedni prikaz postupka proizvodnje ugljikovih vlakana iz katrana i PAN-a

[16]

### 3.4 Odabir osnovne sirovine za ugljična vlakna

Ugljična vlakna nakon procesa karbonizacije prolaze kroz proces površinske obrade, kao tvrd materijal kojem se dodaje matrica od epoksidne smole u svrhu povećanja duktilnosti materijala. Obzirom na njihove mehaničke karakteristike možemo klasificirati kao HS (High Strength – visoke čvrstoće), IM (Intermediate Modulus – umjerenog modula elastičnosti), HM (High Modulus – visokog modula elastičnosti) i UHM (Ultra High Modulus – vrlo visokog modula elastičnosti). Ovisno o odabiru osnovne sirovine zavise i mehaničke karakteristike ugljičnih vlakana, gdje su najbolje mehaničke karakteristike pokazala vlakna na bazi poliakrilonitrila.

[19]

## 4. PRIMJENA KOMPOZITA S UGLJIČNIM VLAKNIMA

### 4.1 Ugljična vlakna u autoindustriji

Vlakna istkana u obliku tkanine upotrebljavaju se u autoindustriji za izradu karoserije povezivanjem laminata (tkanine ugljikovih vlakana) u preprege. Postupak je jednostavan, ali se sastoji od više koraka. Počinje premazom otvorenoga kalupa anti adhezivom, npr. kalup se premaže voskom koji k tome i ispravi sve neravnine kalupa.

Krajevi kalupa zaštite se obostranom samoljepljivom trakom. Nanosi se drugi sloj protiv lijepljenja, što se obično radi štrcanjem poli(vinil-alkohola). Laminat se naštrca adhezivom jer je potrebno kratkotrajno prijanjanje na kalup, dok će se adheziv poslije otopiti u materijalu. Nakon toga laminat se umeće u kalup te se reže radi postizanja potrebnih dimenzija. Obično se stavlja više slojeva laminata prije postavljanja medija za bolji protok te plastične mrežice. Plastični pokrov nalijepi se na samoljepljivu traku te se pod tlačna pumpa spoji na kalup. Kako se zrak izvlači iz kalupne šupljine, u epoksidnu smolu umiješa se katalizator da bi započela polimerizacija te se crijevom spoji s kalupom. Izvlačenjem zraka u kalupnu šupljinu ulazi smola te ispunjava slojeve ugljikovih vlakana i utvrđuje konačnu strukturu kompozita. Nakon što očvrstne, skida se plastični pokrov i postupak je gotov. Očvršćivanje se provodi u autoklavu ako je proizvod namijenjen za zahtjevne primjene. [21]

Zbog svoje visoke cijene ugljikova vlakna jedina su ojačavala kompozita koje je ekonomski isplativo reciklirati. Godišnje se proizvodi 30 000 tona ugljikovih vlakana. Ako se uzme u obzir da kilogram kompozita od ugljikovih vlakana i epoksidne smole stoji i do 150 eura, jasna je isplativost reciklaže. Dva su načina odjeljivanja ugljikovih vlakana iz kompozita. Postupak fluidiziranog sloja donedavno je bio u eksperimentalnoj fazi; do odvajanja vlakana od smole dolazi zbog visokih temperatura. Polimer se energijski iskorištava, a vlakna se dobivaju u čistom stanju, ali su im svojstva neznatno narušena. Za razdvajanje vlakana od smole koriste se tekućine u superkričnim uvjetima. [21]



*Slika 13. Pletena tkanina od karbonskih vlakana*

[24]

Uspješnost reciklaže omogućiti će proizvodnju visokih serija ubrzanjem procesa proizvodnje. Ostali se odnose na konkurentnost cijene materijala, svojstva i trajnost kompozita u širokom spektru upotrebe. Intenzivno se radi na zamjeni postojećih materijala kompozitima s biljnim vlaknima. Ugljikova su vlakna pak još uvijek namijenjena samo za skupe primjene. No kako će potrošnja rasti, a proizvodnja postajati dostupnija i jeftinija, cijena će padati. Zbog toga nije nerealno očekivati skoriju pojavu elemenata karoserije od ugljikovih vlakana kod običnih automobila. Upotrebi modernih kompozita pogodovat će Direktiva 2000/53/EC Europske unije, koja traži da zemlje članice do 2015. godine iskoriste i oporabe 95 % otpadnih vozila. Već je počela proizvodnja vanjskih dijelova koja vodi prema budućim konstrukcijama ultra lakih automobila i konačnoj viziji automobila koji „raste na drveću“. [20]

## 4.2 Eksterijer automobila od ugljičnih kompozita

Pod tim nazivom mislimo na: branike, prednje i zadnje difuzore, poklopce motora, vrata i ostale obloge koje se mogu vidjeti na automobilu. Kotači od Forda GT Carbon Series 2019 su od ugljičnih vlakana, a isti se materijal koristi i za poklopac motora, krov i stražnji dio na kojem se nalaze dvostruke pruge izrađene također od ugljikovih vlakana. Uz ugljične dodatke masa vozila je smanjena za 18 kilograma. [23]



*Slika 14. Ford gt carbon series*

[26]

### 4.3 Interijer od ugljičnih kompozita

Polimerni kompoziti upotrebljavaju se za izradu vanjskog dijela vrata automobila, no postoje i unutarnji moduli vrata proizvedeni od polipropilenske matrice ojačane staklenim i ugljičnim vlaknima. Školjka sjedala nekih automobila, ovisno o opremi, također je načinjena od kompozita ojačanog vlaknima. Primjerice, u Opel Insigniji OPC školjka sjedala je od poliamida ojačanog staklenim vlaknima, čime je postignuta 45 % manja masa nego kod modela s običnim sjedalima. Kompozit je veoma čvrst, a debljina stijenke je samo 2 mm. [23]



*Slika 15. Primjer školjke sjedala od staklenih vlakana*

[23]





*Slika 16. Paneli vrata načinjeni od plastomerne matrice ojačane ugljikovim vlaknima*

[23]



#### 4.4 Primjena ugljičnih vlakana u zrakoplovnoj industriji

Primjenom kompozita u zrakoplovstvu značajno se smanjila masa zrakoplova čime je ostvarena i manja potrošnja goriva te se povećala nosivost na razinu niže mase što je povoljno utjecalo na smanjenje troškova. Airbus zrakoplovi bili su prvi koji su koristili ugljična vlakna za dijelove Airbusa A300. Već kod Airbusa A380 te Airbusa A400M od ugljičnih vlakana izrađena su krila, glavna i središnja vrata zrakoplova, grede kata gornje palube, navlake za pod kod putnika, podupirači i stabilizatori te je samim time smanjena masa za 1,5 tonu. [27]



Slika 17. Prikaz upotrebe ugljičnih vlakana kod Airbus-a A380

[28]

## 4.5 Primjena ugljičnih vlakana u svemirskoj industriji

Ugljična vlakna s epoksi smolom čine kompozite koji su primijenjeni u svemirskim letjelicama, a dijelovi poput antene i strukturalne potpore na letjelici u potpunosti „iskorištavaju“ krutost i dimenzijsku stabilnost vlakana. Orbital Science tvrtka izradila je X-4 raketni avion sa trupom od ugljičnih vlakana. Dugačak 17,6 metara, s rasponom krila od 8,5 metara, te sposoban za brzine do 8 maha. Razlog primjene ugljičnih vlakana u ovom slučaju bila je niska termička ekspanzija te visoka strukturalna krutost. [27]

## 4.6 Primjena ugljičnih vlakana u sportskoj industriji

Materijali koji se upotrebljavaju za izradu čamaca, kao i većina materijala za sportsku upotrebu, uglavnom dolaze iz zrakoplovne i svemirske industrije. Svi proizvođači čamaca primjenjuju iste kompozitne materijale, razlika je načinu upotrebe tih materijala i njihovoj količini u samom proizvodu. Strukturni integritet čamca osigurava vanjski tanak sloj koji se izrađuje iz slojeva kompozitne tkanine kao što su: ugljikova vlakna, staklena vlakna ili aramidna vlakna. Ugljikova vlakna se najčešće upotrebljavaju za izradu sportskih čamaca, zbog svojeg omjera čvrstoće naspram mase. Ugljikova vlakna su jača ako su izrađena iz jednog dijela što veće duljine. Što je dulji jednodijelni dio to je završna konstrukcija čvršća. U različitim dijelovima čamca se upotrebljavaju različita ugljikova vlakna ovisno o zahtjevima koje moraju zadovoljiti. Zato se vrlo mala, gusto pletena ugljikova vlakna zbog svoje savitljivosti i sposobnosti da uđu u nabore primjenjuju za skućena mjesta kao što je sam kraj pramca ili krme. U streljaštvu lukovi i strijele pojačani su ugljičnim vlaknima jer im to daje dodatnu snagu i omogućuje da strijele lete brže i dalje. Na tržištu se proizvodi niz strjelica sa jezgrom od ugljičnih vlakana visoke čvrstoće ili onih od aluminija i ugljičnih vlakana. Teniski reketi su napravljeni s upletenim ugljičnim vlaknima da se stvori snažniji okvir, te se samim time omogućuje „brži“ udarci. Reketi od ugljičnih vlakana zadržavaju svoje visoke performanse i nakon vijeka trajanja do sad korištenih reketa. Kod štapova za pecanje, šipke od ugljičnih vlakana su značajno lakše od bambusa, a to smanjuje masu pri zamahu i povećava točnost.

[27]

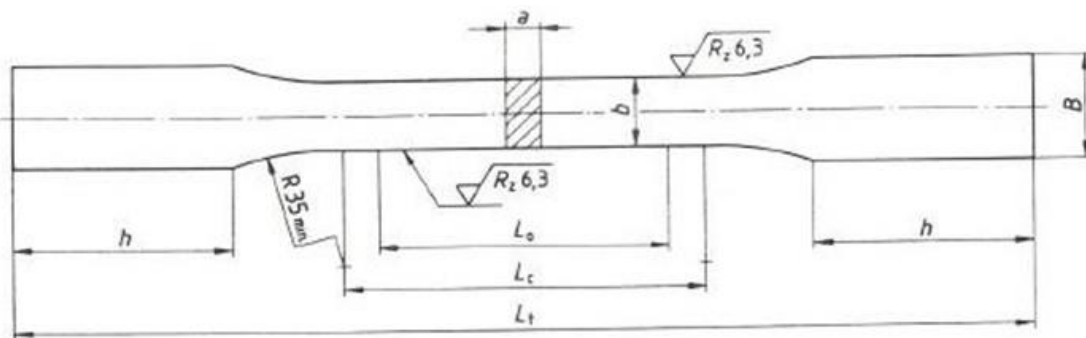
## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

### 5.1 Materijal

Korišteni materijal za eksperimentalni dio zadatka je naručen kao pločasti kompozit ojačan ugljičnim vlaknima. Matrica samog materijala je epoksidna smola koja povećava duktilnost. Karbonske ploče su strukturirane od 4 sloja HT-C tkanine 410 g / m<sup>2</sup> u vezanju od til 2/2. 2 sloja pri 0 ° / 90 ° ili ± 45 ° ( kvazi – izotropne strukture ). E-modul korištenog C-vlakna: oko 230.000N / mm<sup>2</sup> te se gotove ploče žare na 60 ° C 10 sati. Naknadno je uslijedilo izrezivanje epruveta potrebnih za ispitivanje mehaničkih svojstava. Epruvete su uzorci normiranog oblika i dimenzija. Veličina epruveta određena je prema normama ovisno o ispitivanom mehaničkom svojstvu. Epruvete su izrezane na malom CNC stolnom glodalu prema normama.

### 5.2 Epruvete

Epruvete koje se koriste za standardni statički vlačni pokus te određivanje Rp 0,2 mogu biti okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka. Na slici 18. prikazana je epruveta četvrtastog poprečnog presjeka.



Slika 18. Epruveta izrađena standardom DIN 50 125

$$a = 3 \text{ mm}$$

$$b = 10 \text{ mm}$$

$$S_0 = 30 \text{ mm}^2$$

### 5.3 Oprema

U laboratoriju Veleučilišta u Karlovcu odrađen je statički vlačni pokus. On se izvodio na kidalici Shimadzu AG-X. Kidalicom se upravlja putem računala, te programskim paketom Trapezium X, koji omogućava provođenje ispitivanja i zapisivanja rezultata u elektronskom obliku, kao i dobivanje Hookova-a dijagrama na temelju dobivenih rezultat ispitivanja materijala. Na kidalici je moguće vršiti ispitivanje na savijanje i statički vlačni pokus.

Specifikacije kidalice SHIMADZU AG-X:

- mjerno područje do 100 kN,
- ispitivanje na vlak, tlak i savijanje,
- mogućnost ispitivanja plosnih epruveta 0-21 mm (100/50 kN),
- mogućnost ispitivanja okruglih epruveta D4-D24 (100/50 KN).



*Slika 19. Kidalica SHIMADZU AG-X*

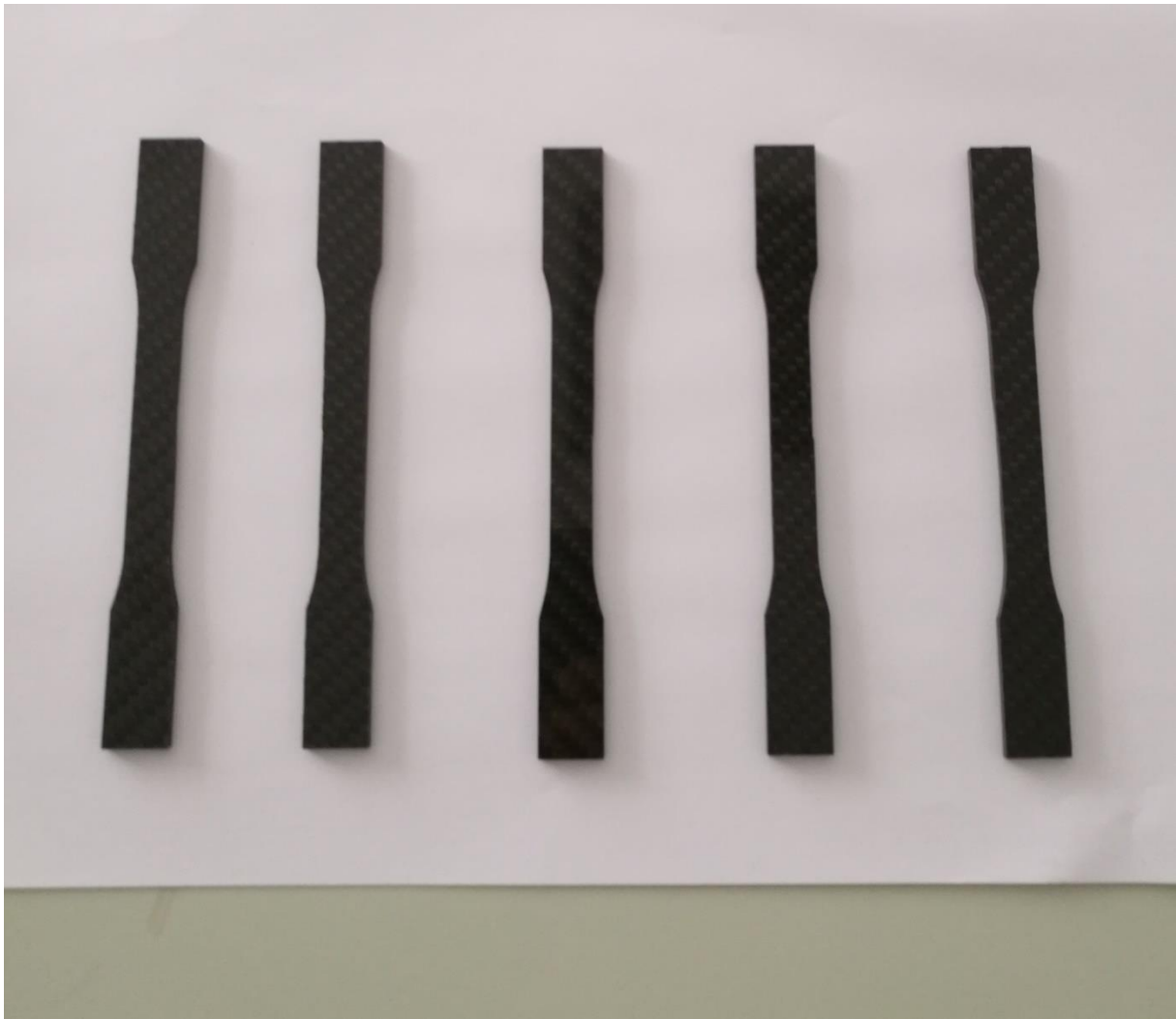


*Slika 20. Stolna glodalica*

## 5.4 Ispitivanje vlačne čvrstoće

U uvjetima normalnoga jednoosnog vlačnog statičkog naprezanja, osnovna mehanička svojstva određuju se statičkim vlačnim pokusom. Ispitivanje se provodi na kidalicama ili univerzalnim ispitivalicama na kojima se epruvete kontinuirano vlačno opterećuju do loma. Pri ispitivanju se kontinuirano mjere sila i produljenje epruvete. Brzina ispitivanja pri provođenju pokusa je 80 N/s, a početna mjerna duljina epruvete ( programski ) 86,84 mm.

Ispitna epruveta opteretila se silom i za svaku ispitnu epruvetu očitano je odgovarajuće produljenje za sile opterećenja. U trenutku loma epruvete, očitana je maksimalna sila. Od svakog uzorka ispitano je 5 epruveta, a dobiveni rezultati uvršteni su u tablice, te iskorišteni za izračun vlačne čvrstoće i modula elastičnosti.



*Slika 21. Epruvete pripravljene za ispitivanje vlačne čvrstoće*





*Slika 22. Epruveta postavljena u kidalicu*

Vlačna čvrstoća računa se prema izrazu

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ N/mm}^2 \quad (1)$$

gdje je:

$R_m$  – vlačna čvrstoća, N/mm<sup>2</sup>

$F_m$  – maksimalna sila opterećenja, N

$S_0$  – površina početnog poprečnog presjeka, mm<sup>2</sup>

Granica loma

$$R_k = \frac{F_k}{S_0} \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

$F_k$  - konačna sila, N

$S_0$  – površina početnog poprečnog presjeka, mm<sup>2</sup>

Vrijednost istezanja nakon loma epruvete određuje se izrazom

$$\varepsilon_u = \frac{\Delta L_u}{L_0} \text{ mm/mm} \quad (3)$$

Gdje je :

$\Delta L_u$  – produljenje, mm

$L_0$  – početna duljina epruvete, mm

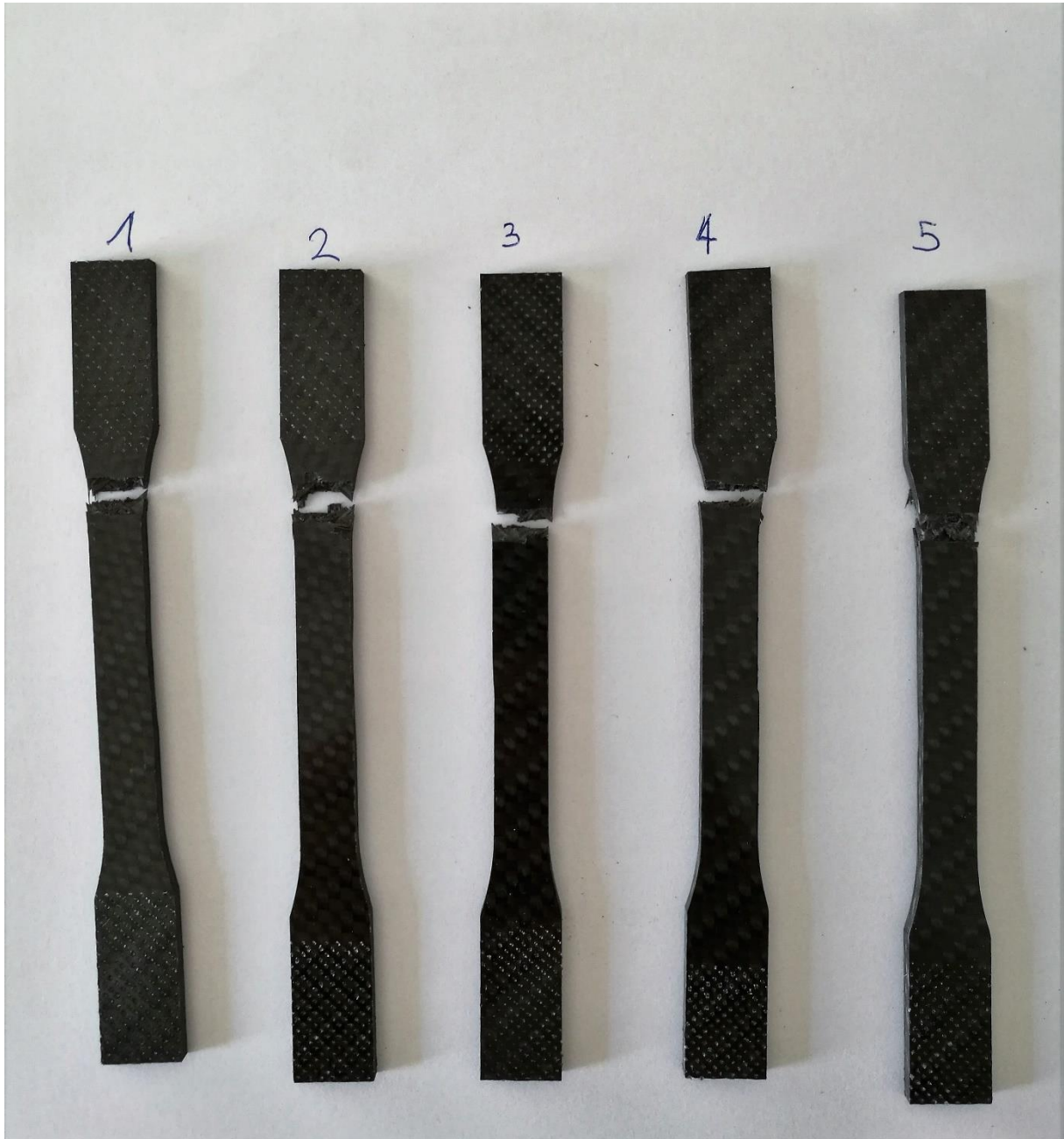
Istezanje epruvete u postocima

$$A = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 \% \quad (4)$$

A – istezanje, %

## 5.5 Rezultati ispitivanja

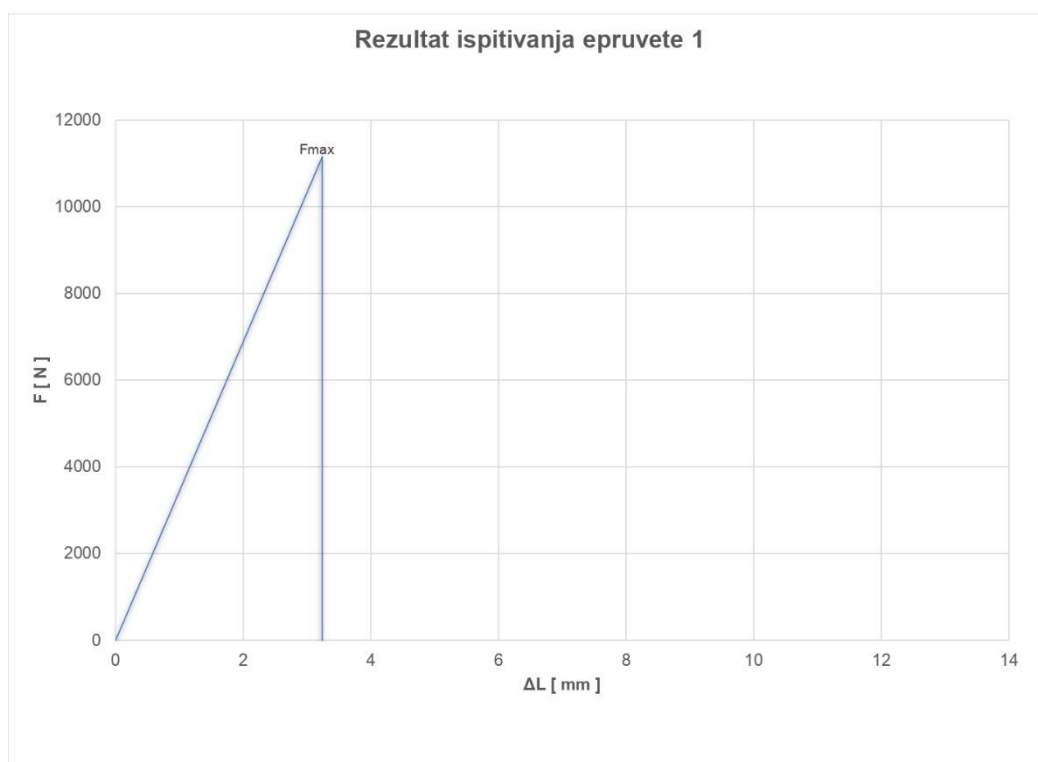
U nastavku su prikazane epruvete nakon provedenog ispitivanja.



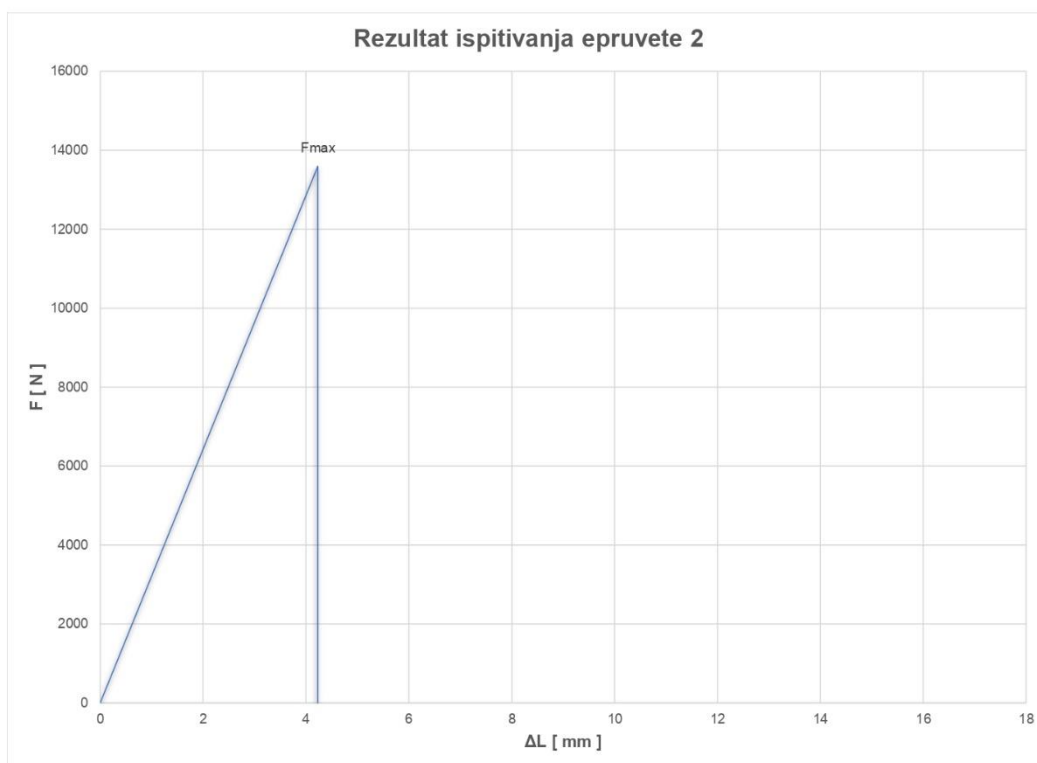
*Slika 23. Epruvete od ugljičnih vlakana nakon provedenog ispitivanja*

Tablica 2. Rezultati ispitivanja

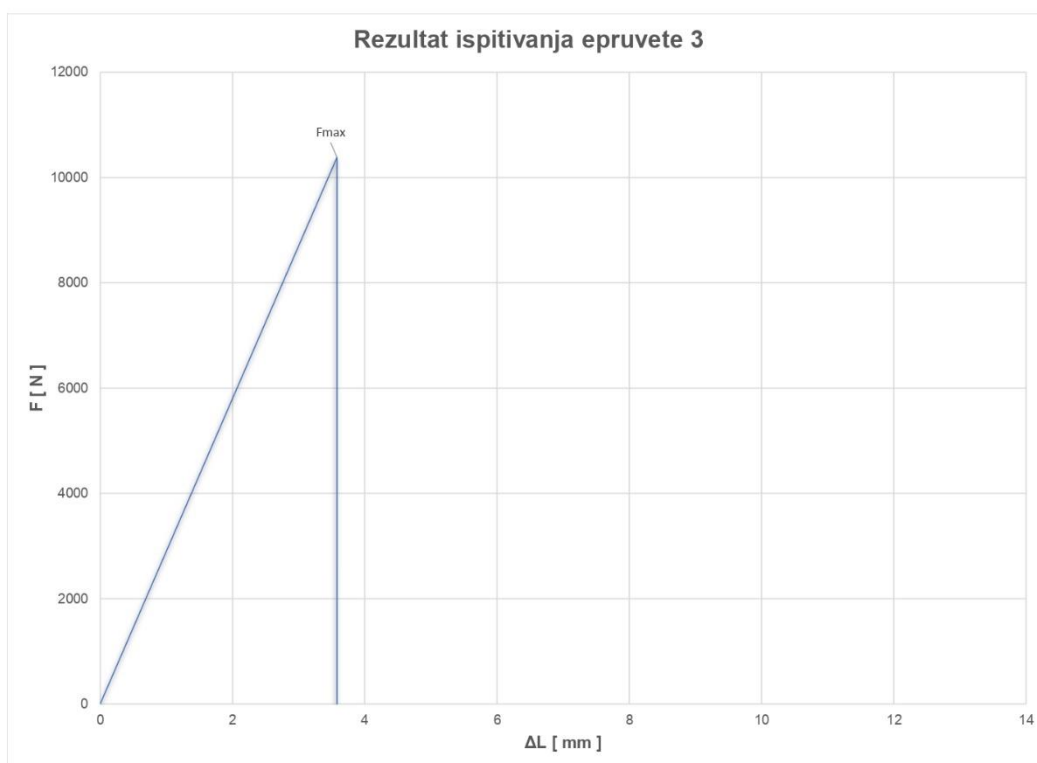
Epruvete	Maksimalna sila (Fm) N	Sila loma (Fk) N	Vlačna čvrstoća (Rm) N/mm <sup>2</sup>	Čvrstoća kod kidanja (Rk) N/mm <sup>2</sup>	Produljenje ΔL mm	Istezanje %
1	11157.5	11153.9	371.918	371.798	3.240	3.731
2	13594.4	13594.4	453.147	453.147	4.231	4.873
3	10383.6	10383.6	346.120	346.120	3.587	4.131
4	11155.8	11155.8	371.860	371.860	3.846	4.429
5	9199.21	9199.21	306.640	306.640	3.442	3.964



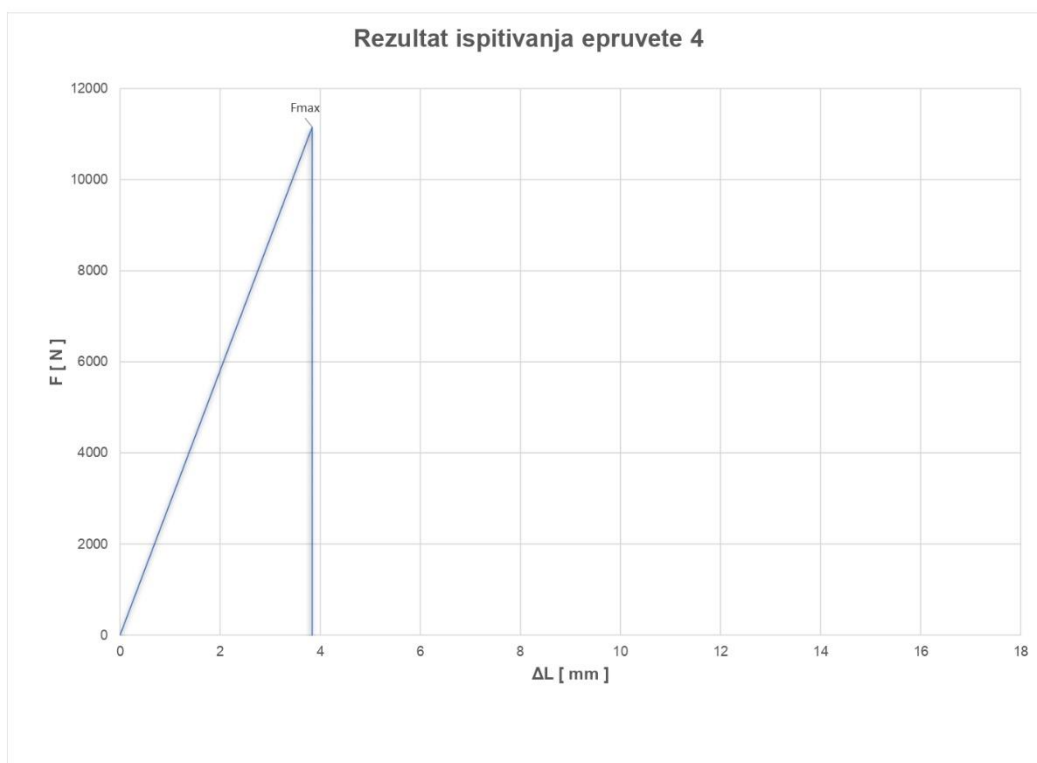
Slika 24. Dijagram sila / produljenje za epruvetu 1



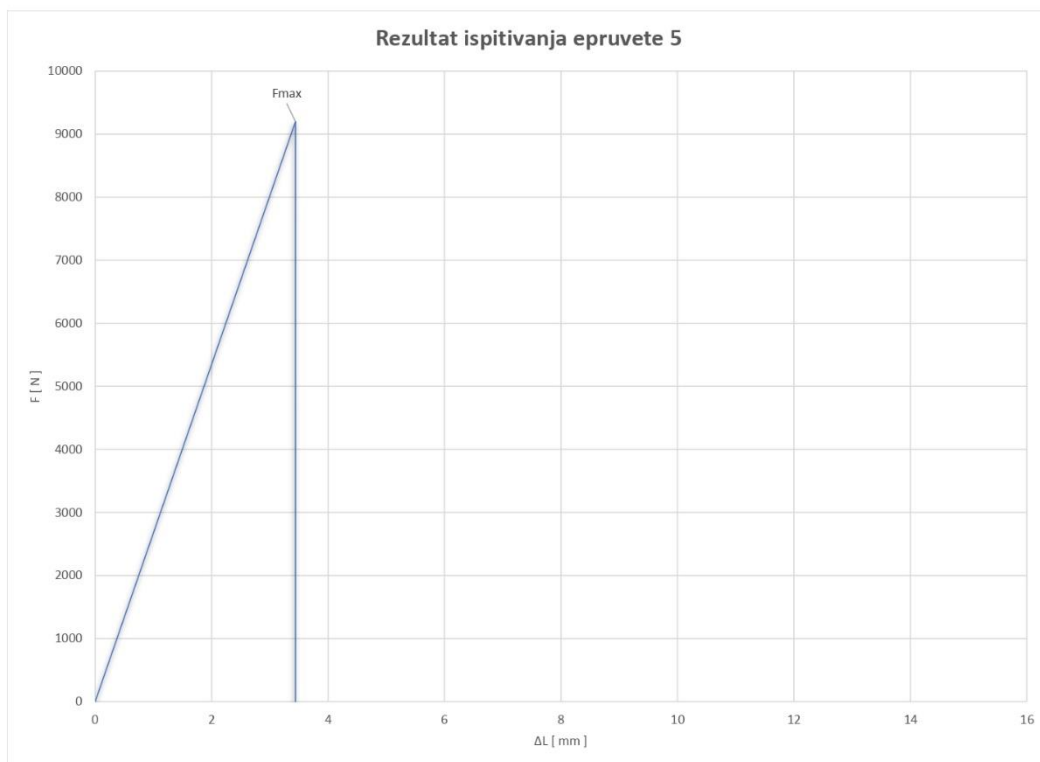
*Slika 25. Dijagram sila / produljenje za epruvetu 2*



*Slika 26. Dijagram sila / produljenje za epruvetu 3*



*Slika 27. Dijagram sila / produljenje za epruvetu 4*

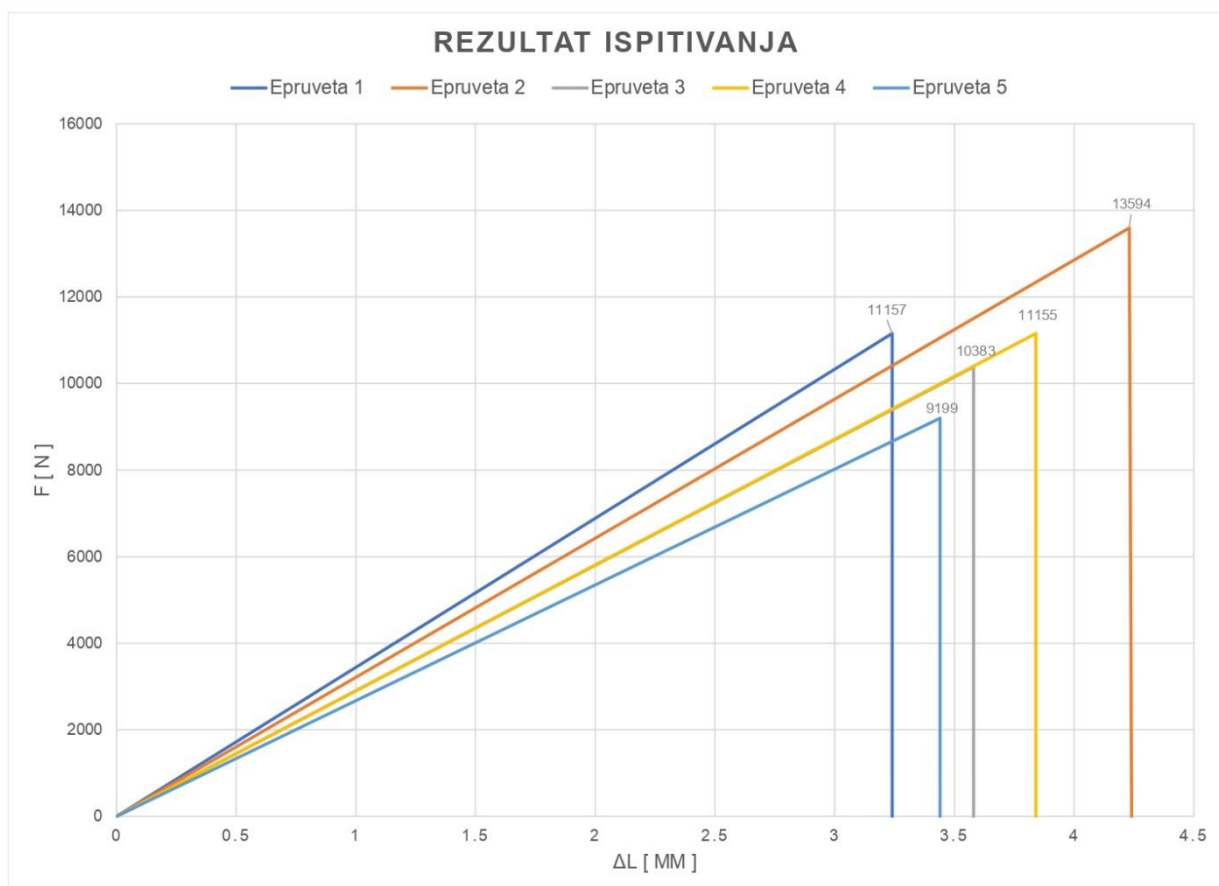


*Slika 28. Dijagram sila / produljenje za epruvetu 5*

## 5.6 Analiza rezultata

Rezultati dobiveni ispitivanjem vlačne čvrstoće su očekivani s obzirom da se radi o kompozitnom materijalu ojačanom ugljičnim vlaknima koja znatno povećavaju čvrstoću kompozitu. Maksimalna sila (  $F_m$  ) i sila loma (  $F_k$  ) vrlo su male razlike što je još jedna od karakteristika takvog materijala. Duktilnost je povećana jer je matrica načinjena od epoksidne smole. Takav kompozitni materijal je pogodan za primjenu u područjima gdje je potrebna visoka čvrstoća, tvrdoća i strukturalna krutost.

Najmanju vrijednost vlačne čvrstoće pokazala je epruveta 5 i ona iznosi  $R_m = 306.640 \text{ N/mm}^2$  dok je najveću vrijednost pokazala epruveta 2 iznosom  $R_m = 453.147 \text{ N/mm}^2$ . Srednja vrijednost vlačne čvrstoće iznosi  $R_m = 369,937 \text{ N/mm}^2$



Slika 29. Dijagram sila / produljenje



## 5.7 Primjer primjene polimernih kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima kod konstrukcije karoserije

Teško je reći tko je prvi započeo, ali možda je malo lakše procijeniti tko je dao najviše doprinosa u pogledu ulaska novih tehnologija i materijala u svijet industrije automobila. Metal je, tradicionalno, bio osnova svih konstrukcija i premda pod tim pojmom podrazumijevamo različite materijale, čelik je gotovo u pravilu dominirao gotovo cijeli vijek. Sada u cijelu priču sve više ulaze novi materijali, bilo da je riječ o dorađenim legurama tradicionalnih ili sintetičkim proizvodima. Kada govorimo o laganim materijalima u automobilskoj industriji svakako je ona o ugljičnim vlaknima i kevlaru. Riječ je o sintetičkim materijalima koji se proizvode u obliku vrlo tankih vlakana koja se potom pleću u tkaninu, ubacuju u kalup te zalijevaju epoksidom čijim otvrdnjavanjem dobivamo čvrst i lagan materijal. Dijelovi napravljeni od ugljičnih vlakana su oko pet puta čvršći od onih napravljenih od čelika uz šta imaju i znatno manju masu.

Karoserija od polimernih kompozita u današnje je vrijeme popularna među super automobilima koji uz iznimne specifikacije i najbolje performanse često oduzimaju dah svojom pojavom. Visoka čvrstoća i tvrdoća uz veoma malu masu najvažnija su svojstva takve vrste karoserije. Troškovi izrade iznimno su visoki pa se takva karoserija upotrebljava samo u vozilima kojima su spomenuta svojstva bitna, dakle u sportskim automobilima namijenjenima za utrke, dokazivanje ubrzanja, brzine i pouzdanosti. Izvrstan primjer je automobil Lexus LFA, čija je karoserija načinjena od 65 % polimernih kompozita na osnovi epoksidne smole ojačane ugljikovim vlaknima. Time je karoserija olakšana za čak 100 kg. [22], [23]



*Slika 30. Karoserija od Lexus LFA*

## 6. ZAKLJUČAK

Iako su skupa, ugljična vlakna se primjenjuju u svim granama industrije. Proizvode se od pamuka, katrana ili poliakrilonitrila kao osnovnih sirovina. Vlakna na bazi poliakrilonitrila se koriste kao osnovna sirovina za preko 90% proizvodnje karbonskih vlakana. Ovisno o izboru osnovne sirovine mijenjaju se mehaničke karakteristike, gdje nabolje rezultate daju vlakna na bazi poliakrilonitrila. Ugljični kompoziti imaju višestruko nižu gustoću od aluminija, da se čelik i ne spominje. Razlog nepotpune primjenljivosti ugljičnih kompozita je što oni nisu jeftino rješenje. Stoga je zadaća ubrzati proizvodnju polimernih kompozita pa će sukladno tomu i cijene biti prihvatljivije te će se skuplje komponente ugrađivati i u automobile za širok krug ljudi. Unutar završnog rada ispitane su epruvete izrađene od kompozita s ugljičnim vlaknima te su ispitana mehanička svojstva kao što je vlačna čvrstoća. Iz dobivenih rezultata kao što je i pretpostavljeno ugljična vlakna su se pokazala kao izvrstan materijal u područjima gdje je potrebna visoka čvrstoća i mala težina.

# LITERATURA

- [1] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011.
- [2] [https://www.fsb.unizg.hr/zavod\\_zamaterijale/download/8f5b1e68977077c0bc5053548b75628c.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/zavod_zamaterijale/download/8f5b1e68977077c0bc5053548b75628c.pdf),
- [3] <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:taPwblCLUGgJ:https://www.hup.hr/EasyEdit/UserFiles/Marija%2520%25C5%25A0utina/Kompozitni%2520materijali.docx+&cd=3&hl=hr&ct=clnk&gl=hr>
- [4] [https://www.google.com/search?q=kompozit+s+%C4%8Desticama&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjO7cWEmvHiAhUlXosKHd56AFYQ\\_AUIECgB&biw=1536&bih=706&dpr=1.25#imgrc=y3BDbF4umg5NPM](https://www.google.com/search?q=kompozit+s+%C4%8Desticama&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjO7cWEmvHiAhUlXosKHd56AFYQ_AUIECgB&biw=1536&bih=706&dpr=1.25#imgrc=y3BDbF4umg5NPM):
- [5] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [6] <http://aerospaceengineeringblog.com/sandwich-panel/>
- [7] <http://hdmt.hr/wp-content/uploads/2016/03/1.pdf>
- [8] [http://mohan.mse.gatech.edu/Research/stereocomplex\\_fiber/fig2.JPG](http://mohan.mse.gatech.edu/Research/stereocomplex_fiber/fig2.JPG)
- [9] <https://ironlady003.wordpress.com/2014/05/12/kompozitni-materijali/>
- [10] W. D. Calister, Jr., Materials Science and Engineering – an Introduction, John Wiley&Sons, New York, 2000.
- [11] Chung D. D. L.: Carbon fiber composites, Butterworth – Heinemann, Newton, 1994
- [12] Modern Materials and Manufacturing Processes. Third Edition. R. Gregg Bruce ... [et al.]. 2004, Pearson Education, Inc., 468 pages
- [13] Engineering Materials: Properties and Selection. Ninth Edition. Kenneth G. Budinski, Michael K. Budinski. 2010, Pearson Education, Inc., 774 pages.
- [14] Erich F., Arnold K.F., Dieter J. "Chemie Ingeieur Technik" August 1971.
- [15] Soo-Jin Park and Gun-Young Heo, „Precursors and Manufacturing of Carbon Fibers“, Springer Series in Materials Science, Vol. 210, poglavlje 2
- [16] Peters, I. (ur.): Handbook of composites, Chapman & Hall, London, 1998
- [17] Recycling carbon fibre, [www.bis.gov.uk/files/file34992.pdf](http://www.bis.gov.uk/files/file34992.pdf)
- [18] Macan, J.: nastavni materijali iz kolegija Kompozitni materijali, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2011
- [19] William D. Callister, Jr. „Materials science and engineering : an introduction“, 7th ed, poglavlje 16
- [20] Mohanty, A. K., Misra, M., Drzal, L. T. (ur.): Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites, Taylor & Francis, Boca Raton, 2005.
- [21] <https://hrcak.srce.hr/file/116688>
- [22] Lexus LFA, [www.lexus-int.com/models/LFA/tech-features-01.html](http://www.lexus-int.com/models/LFA/tech-features-01.html)
- [23] <https://www.fsb.unizg.hr/polimeri/fileopen.php?id=1298>
- [24] <http://kompozit-kemija.hr/portfolio-posts/karbonska-vlakna>
- [25] Schmitt, B.: The Making Of The Lexus LFA Supercar: Who, What, Where And Most Of All Why. An Inside The Industry Report, Chapter 1: From A Bar To Bar None, [www.thetruthaboutcars.com/2012/07/the-making-of-the-lexus-lfa-supercar-who-what-where- and-most-of-all-why-an-inside-report-chapter-1-from-a-bar-to-bar-none/](http://www.thetruthaboutcars.com/2012/07/the-making-of-the-lexus-lfa-supercar-who-what-where- and-most-of-all-why-an-inside-report-chapter-1-from-a-bar-to-bar-none/)
- [26] <https://autogaraza.hr/novosti/karbonski-ford-gt/#more>
- [27] Peter Morgan, Carbon fibers and their composites 2005
- [28] <http://www.euroaviasevilla.es/compositesymposium/imagenes/9119.jpg>

## POPIS PRILOGA

Prilog 1. Izvješće o ispitanom materijalu epruvete 1.....	53
Prilog 2. Izvješće o ispitanom materijalu epruvete 2.....	54
Prilog 3. Izvješće o ispitanom materijalu epruvete 3.....	56
Prilog 4. Izvješće o ispitanom materijalu epruvete 4.....	58
Prilog 5. Izvješće o ispitanom materijalu epruvete 5.....	60

## IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

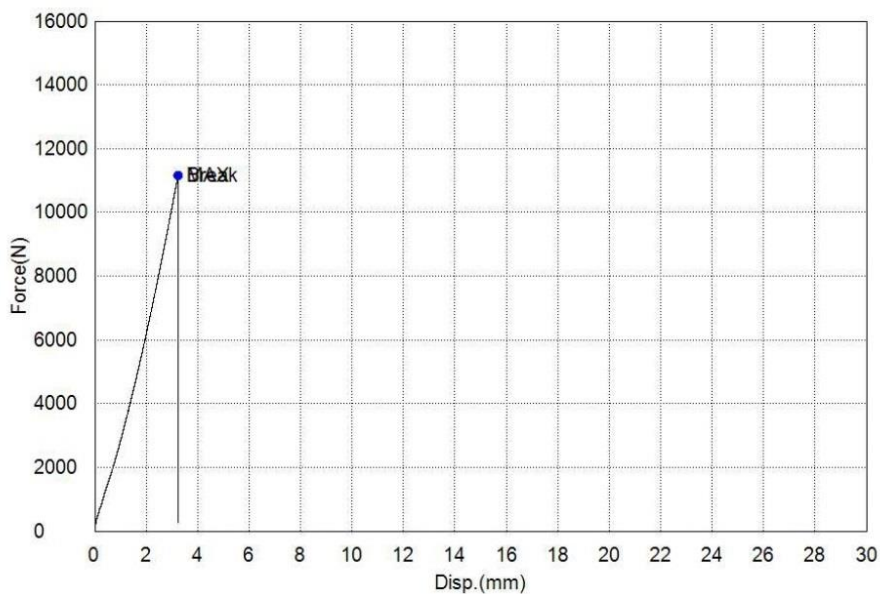
Radni nalog		Naručilac	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	
Materijal	Karbon	Količina	
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	3x10	Toplinska obrada	
Predmet		Brzina ispitivanja	80 N/sec
Datum ispitivanja		Norma	

Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	11157.5	371.918	3.24021	3.73167

Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	11153.9	371.798	3.24063	3.73215

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	-.-	-.-	-.-	-.-

Name	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_1	-.-	-.-	-.-	-.-



## IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

Radni nalog		Naručilac	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	
Materijal	Karbon	Količina	
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	3x10	Toplinska obrada	
Predmet		Brzina ispitivanja	80 N/sec
Datum ispitivanja		Norma	

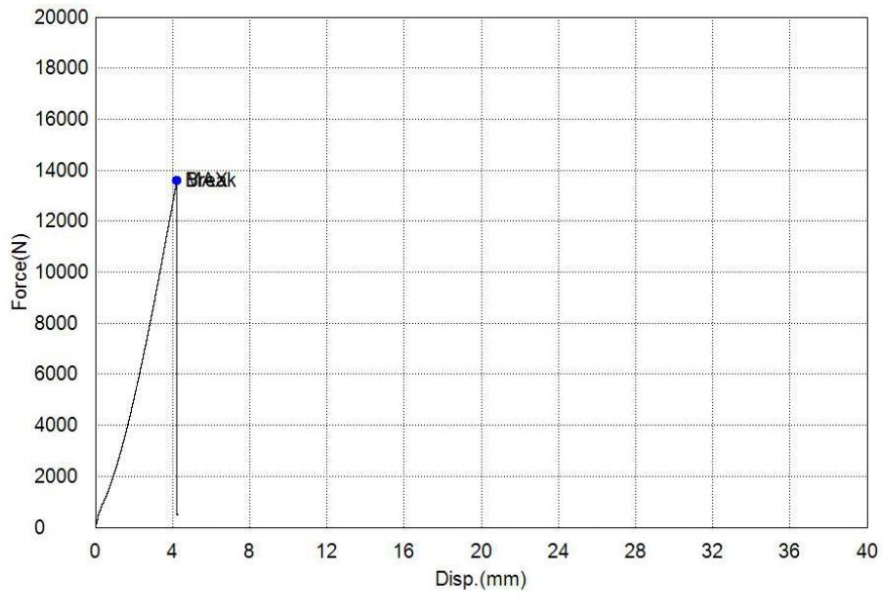
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_2	13594.4	453.147	4.23129	4.87308

Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_2	13594.4	453.147	4.23129	4.87308

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_2	--	--	--	--

Name	YP(%FS)_Disp.	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke
Parameters	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	mm	N	N/mm2	mm
1_2	--	--	--	--

Name	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %
Unit	%
1_2	--



Comment



Prilog 3. Izvješće o ispitanom materijalu epruvete 3

## IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

Radni nalog		Naručilatelj	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	
Materijal	Karbon	Količina	
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	3x10	Toplinska obrada	
Predmet		Brzina ispitivanja	80 N/sec
Datum ispitivanja		Norma	

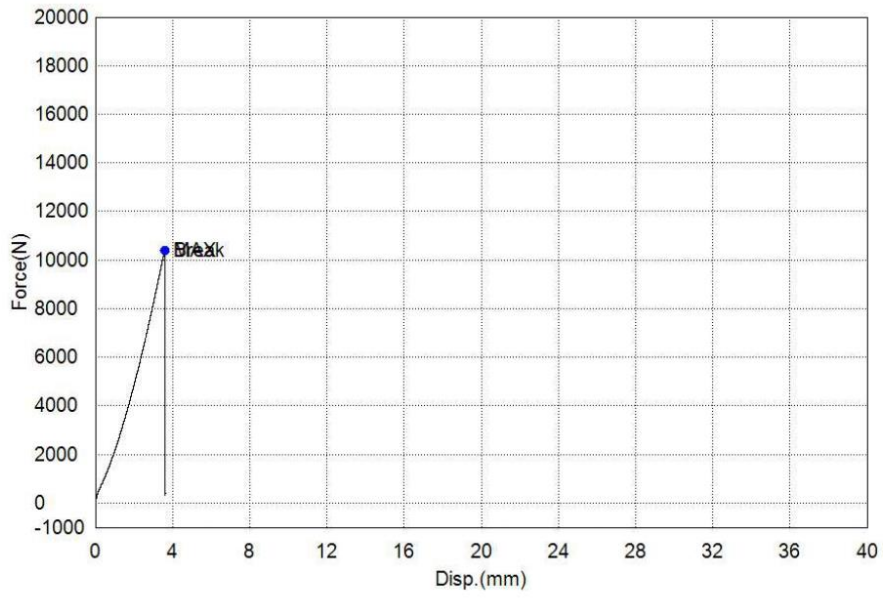
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_3	10383.6	346.120	3.58715	4.13123

Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_3	10383.6	346.120	3.58715	4.13123

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_3	--	--	--	--

Name	YP(%FS)_Disp.	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke
Parameters	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	mm	N	N/mm2	mm
1_3	--	--	--	--

Name	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %
Unit	%
1_3	--



Comment

Prilog 4. Izvješće o ispitanom materijalu epruvete 4

## IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

Radni nalog		Naručilac	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	
Materijal	Karbon	Količina	
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	3x10	Toplinska obrada	
Predmet		Brzina ispitivanja	80 N/sec
Datum ispitivanja		Norma	

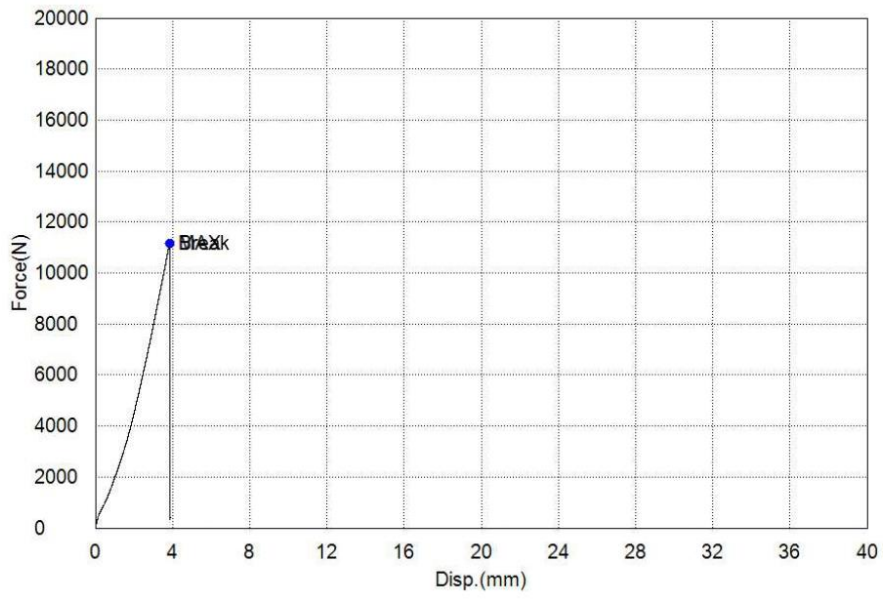
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_4	11155.8	371.860	3.84627	4.42966

Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_4	11155.8	371.860	3.84627	4.42966

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_4	--	--	--	--

Name	YP(%FS)_Disp.	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke
Parameters	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	mm	N	N/mm2	mm
1_4	--	--	--	--

Name	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %
Unit	%
1_4	--



Comment

## IZVJEŠĆE O ISPITIVANJU MATERIJALA

Radni nalog		Naručilac	Veleučilište u Karlovcu
Broj crteža		Narudžba br.	
Materijal	Karbon	Količina	
Norma		Tehnički propis	
Broj šarže		Broj probe	
Dimenzija	3x10	Toplinska obrada	
Predmet		Brzina ispitivanja	80 N/sec
Datum ispitivanja		Norma	

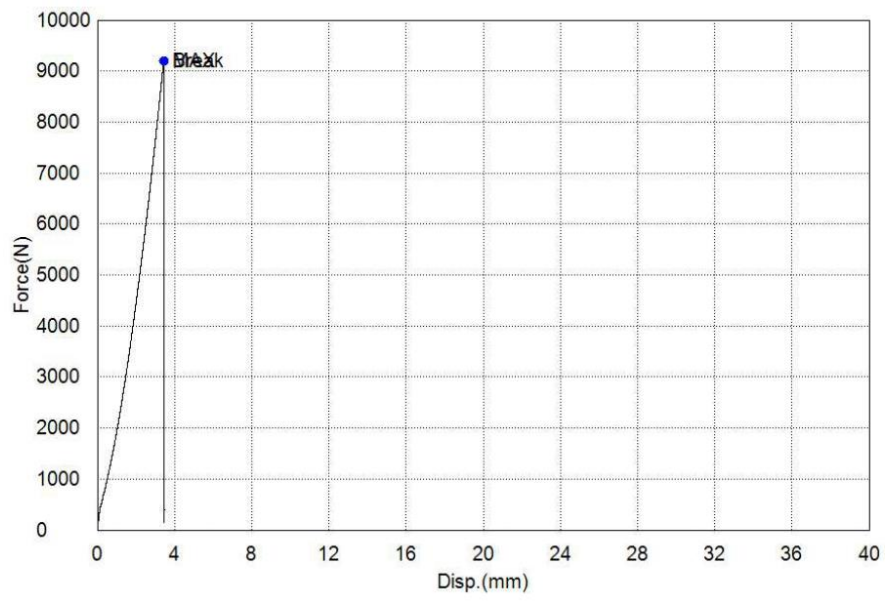
Name	Max_Force	Max_Stress	Max_Stroke	Max_Stroke Strain
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_5	9199.21	306.640	3.44265	3.96481

Name	Break_Force	Break_Stress	Break_Stroke	Break_Stroke Strain
Parameters	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10	Sensitivity: 10
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_5	9199.21	306.640	3.44265	3.96481

Name	YP(%FS)_Force	YP(%FS)_Stress	YP(%FS)_Stroke	YP(%FS)_Stroke Strain
Parameters	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Unit	N	N/mm2	mm	%
1_5	--	--	--	--

Name	YP(%FS)_Disp.	YS1_Force	YS1_Stress	YS1_Stroke
Parameters	0,1 %	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Unit	mm	N	N/mm2	mm
1_5	--	--	--	--

Name	YS1_Stroke Strain
Parameters	0,2 %
Unit	%
1_5	--



Comment